

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

“Diseño de un sistema de control y
adquisición de datos para una planta de
desalación de membranas asistida por
energía solar”

Curso 2014/2015

Alumno/a:

Juan Horacio Mañas Méndez

Director/es:

Dr. D. Manuel Berenguel Soria

Dr. D. Manuel Pérez García

A mis padres,
Juan Antonio y María

Agradecimientos

Estas pocas líneas, quieren agradecer a todas las personas que han ayudado a hacer este proyecto realidad. En primer lugar y con especial énfasis, quiero agradecer a mi familia todo el apoyo recibido. Ellos, mejor que nadie, me han sufrido y soportado en los inconvenientes monumentales que surgían conforme avanzaba este proyecto. Mi más profundo respeto y admiración a unos padres que, aun sin haber podido optar a ningún tipo de estudios, se interesaban y trataban de dar consejo y soluciones, de lo más variopintas, a problemas que les costaba terminar de asimilar. Lo que sí pudieron enseñarme es a ser agradecido, por tanto, ampliando un poco más este círculo, gracias:

A mis compañeros de trabajo: Miguel Ibáñez, Carlos Donaire y Teresa Recio, no sólo por su comprensión durante este trabajo fin de grado, sino por la paciencia de soportarme a lo largo de estos años de carrera.

Al grupo de ingenieros *STARK Industries*: María D. Fernández, Adrián P. Kurucz y Miguel A. Giménez, por vuestra ayuda en los difíciles comienzos. Vosotros creísteis en mis capacidades más que yo mismo. Parte de este trabajo es literalmente vuestro.

Mención especial para Juan Antonio Andrés Mañas, mi más estrecho colaborador en el desarrollo y puesta en marcha de todas las instalaciones. Él, mejor que nadie, conoce el trabajo que hay detrás de ellas y gracias a sus exhaustivas revisiones se ha conseguido un elevado grado de robustez en las mismas.

Gracias a mi director Dr. D. Manuel Berenguel Soria y subdirector Dr. D. Manuel Pérez García, por confiar en mis capacidades y darme esta oportunidad de abordar un trabajo de estas dimensiones e importancia con total apoyo y autonomía. No puedo olvidarme de Dr. D. Francisco de Asís Rodríguez Díaz, Dr. D. Guillermo Zaragoza, Jorge Antonio Sánchez Molina y Rafael Mena Yedra, quienes han sido fuente de conocimientos y soporte, gracias a su dilatada experiencia, frente a las innumerables incidencias que han ido surgiendo.

Y para concluir, gracias por el apoyo moral y espiritual recibido del presidente del *Club de los Fritos*, José Manuel Rodríguez Torres y todos sus miembros: Agustín, Alberto, Dani, Gómez, Kurucz, Miguel y Reyes.

Resumen

El desarrollo del presente trabajo se ha realizado dentro el grupo de investigación TEP-197: Automática, Robótica y Mecatrónica que forma parte del Centro Mixto de Investigación en Energía Solar CIESOL.

El centro CIESOL es un instituto mixto de investigación creado y gestionado entre la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería, perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) del Ministerio de Economía y Competitividad.

A lo largo de esta memoria, se tratarán de describir los trabajos realizados para llevar a cabo la instalación del control automático de una planta de destilación por membranas, asistida por energía solar y la implementación de la herramienta SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*, sistema de control supervisor y adquisición de datos) encargada de gobernar dichas instalaciones experimentales. Una primera parte abordará desde un punto de vista físico y eléctrico todo el sistema de control y adquisición de datos. En el segundo bloque de este documento, se encuentra la explicación del desarrollo de la herramienta SCADA y una descripción de sus funcionalidades.

Abstract

This dissertation has been developed within the framework of the research Group: TEP-197: Automatic Control, Robotics and Mechatronics, which is part of the Mixed Research Center on Solar Energy CIESOL.

The research center CIESOL is a mixed institution set up and managed between University of Almería and the PSA (Plataforma Solar de Almería) which is part of CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness.

The first part of the manuscript reflects the procedure and solutions proposed to setup the electrical and instrumentation system required to control a solar membrane distillation facility, while the second part includes the development of a Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) for this system.

Índice

Agradecimientos.....	IV
Resumen	VI
<i>Abstract</i>	VI
Índice	VIII
Nomenclatura	XII
Listado de imágenes	XIV
Listado de tablas	XX
Capítulo 1. Interés y objetivos	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Contexto de desarrollo	4
1.4. Resumen de resultados	7
1.5. Planificación temporal.....	8
1.6. Estructura de la memoria del TFG	9
Capítulo 2. Revisión bibliográfica	11
Capítulo 3. Material y métodos	13
3.1. Instrumentación y control por computador.....	13
3.1.1. Estructura de una aplicación de instrumentación y control por computador.....	13
3.1.2. Sensores y transductores	14
3.1.3. Tipos de señales.....	15
3.1.4. Acondicionamiento de señal	16
3.1.4.1. Amplificación	16
3.1.4.2. Linealización	17
3.1.4.3. Aislamiento	17
3.1.4.4. Filtrado.....	17
3.1.5. Electrónica de adquisición de datos	18
3.1.5.1. Entradas y salidas analógicas.....	18
3.1.5.1.1. Entradas analógicas en modo diferencial	19
3.1.5.1.2. Entradas analógicas con referencia (RSE)	20
3.1.5.1.3. Entradas analógicas sin referencia (NRSE)	20
3.1.5.2. Conversión a digital	21
3.1.5.2.1. Frecuencia de muestreo	21
3.1.5.2.2. Cuantificación y resolución	22
3.1.5.2.3. Niveles de entrada.....	23

3.1.5.2.4. Puertos digitales	23
3.1.5.3. Instrumentación virtual	24
3.2. Descripción de la planta.....	25
3.2.1. Diagrama conceptual del funcionamiento de la planta	25
3.2.1.1. Descripción de procesos	26
3.2.1.1.1. Campo solar	26
3.2.1.1.2. Desaladora	28
3.2.1.2. Elementos	30
3.2.1.2.1. Captadores solares planos.....	30
3.2.1.2.2. Depósito Acumulador.....	32
3.2.1.2.3. Distribuidor.....	32
3.2.1.2.4. Aerotermo	33
3.2.1.2.5. Membrana de destilación.....	34
3.2.1.2.6. Depósito de destilado.....	35
3.2.1.3. Modos de operación.....	35
3.2.2. Descripción del sistema de medida	38
3.2.2.1. Sondeas de temperaturas	38
3.2.2.2. Caudalímetros.....	40
3.2.2.3. Sensores de presión.....	41
3.2.2.4. Conductímetros	42
3.2.2.5. Balanza.....	44
3.2.3. Descripción del sistema de actuación	47
3.2.3.1. Bombas	47
3.2.3.2. Variadores.....	48
3.2.3.3. Válvulas de retención	49
3.2.3.4. Válvulas proporcionales	50
3.2.3.5. Válvula todo/nada	53
3.2.3.6. Relés.....	54
3.2.4. Arquitectura hardware y software de la red	55
3.2.4.1. Hardware	55
3.2.4.1.1. Computador SCADA.....	56
3.2.4.1.2. cRIO-9074	58
3.2.4.1.3. NI 9146	59
3.2.4.1.4. Switch Industrial IES5100	60
3.2.4.1.5. NI 9221	60
3.2.4.1.6. NI 9217	61
3.2.4.1.7. NI 9203	62
3.2.4.1.8. NI 9264	63
3.2.4.1.9. NI 9375	64
3.2.4.2. Software	65

3.3. Especificaciones de diseño de la herramienta SCADA.....	72
3.3.1. Especificaciones técnicas.....	72
3.3.2. Especificaciones generales de diseño del sistema SCADA	73
3.3.3. Normativa a cumplir	73
3.3.3.1. Norma ISO 9241.....	73
3.3.3.2. Directiva 98/37/CE.....	75
3.3.3.3. Norma ISO 11064.....	75
3.3.3.4. ISA 101	75
3.3.3.5. RD 488/1997	75
3.3.3.6. Norma ISA S5	76
3.3.3.7. Norma UNE 1063	76
3.3.3.8. GEDIS	76
3.4. Diseño del sistema SCADA	79
3.4.1. Arquitectura general de funcionamiento de un sistema SCADA	79
3.4.1.1. Estructura interna de una herramienta SCADA comercial.....	80
3.4.2. Herramientas de desarrollo del sistema SCADA	81
3.4.2.1. OPC (Ole for Process Control).....	81
3.4.2.2. LabVIEW.....	83
3.4.3. Diseño del interfaz de la herramienta SCADA.....	89
3.4.3.1. Arquitectura.....	90
3.4.3.2. Distribución de pantallas y navegación	91
3.4.3.3. Color y texto	93
3.4.3.4. Equipos, valores y tablas	95
3.4.3.5. Alarmas	96
Capítulo 4. Resultados y discusión	99
4.1. Herramienta SCADA.....	99
4.1.1. <i>Control Panel</i> (pantalla de control)	99
4.1.2. <i>Automatic control</i> (control automático)	105
4.1.3. <i>Process Control Graph</i> (gráfico de control de proceso)	105
4.1.4. <i>Read & Write Configuration</i> (configuración de lectura y escritura)	106
4.1.5. <i>Data File Configuration</i> (configuración de archivos de datos).....	106
4.1.6. <i>Alarms Configuration</i> (configuración de alarmas)	108
4.2. Puesta en marcha y comprobación de funcionamiento	109
4.3. Análisis y resolución de problemas	110
4.3.1. Problema del ruido en la lectura de los Promag 50H	110

4.3.2. Problema en la adquisición de datos de la FG-150KAL.....	117
4.4. Evaluación de la herramienta SCADA por parte de los responsables de la instalación.....	120
Capítulo 5. Conclusiones y propuesta de mejoras	123
Bibliografía.....	125

Nomenclatura

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO DEL ACRÓNIMO	TRADUCCIÓN
A/D	<i>Analog to Digital</i>	Analógico a Digital
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Conversor analógico a digital
CEN	Comité Europeo de Normalización	
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica	
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas	
CIESOL	Centro en Investigación de Energía Solar	
CIM	<i>Computer Intergrated Manufacturing</i>	Fabricación integrada por computador
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i>	Rechazo en modo común
COM	<i>Component Object Model</i>	Modelo de objeto de componente
CompactRIO cRIO	<i>Compact Reconfigurable Input/Output</i>	Entrada y salida compacta y reconfigurable
CPU	<i>Central Processing Unit</i>	Unidad de procesamiento central
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>	Conversor digital a analógico
DAQ	<i>Data acquisition</i>	Adquisición de datos
DC	<i>Direct Current</i>	Corriente continua
DCS	<i>Distributed Control System</i>	Sistema de control distribuido
DL	<i>Data Logger</i>	Sistema de almacenamiento de datos
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>	Planificación de recursos empresariales
FIFO	<i>First-In First-Out</i>	Primero en entrar, primero en salir
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>	Array de puertas lógicas programable
GPIB	<i>General Purpose Instrumentation Bus</i>	Bus de instrumentación de propósito general
HIHI	<i>High-High</i>	Nivel de alarma alto-alto
HMI	<i>Human Machine Interface</i>	Interfaz persona-máquina
I/O	<i>Input/Output</i>	E/S (Entrada/Salida)
LAN	<i>Local Area Network</i>	Red de área local
LO	<i>Low</i>	Nivel de alarma bajo
MD	<i>Membrane Distillation</i>	Destilación por membrana
MAX	<i>Measurement & Automation Explorer</i>	Software explorador de medidas y automatización
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>	Gestión de la producción
NI	<i>National Instruments</i>	
NRSE	<i>Non-Referenced Single Ended</i>	Entrada sin referencia común
ODBC	<i>Open DataBase Connectivity</i>	Conexión abierta con base de datos
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>	Incrustación y enlazado de datos
OPC	<i>OLE for Process Control</i>	OLE para control de procesos
PAC	<i>Programmable Automation Controller</i>	Controladores de automatización programables
PC	<i>Personal Computer</i>	Computador personal
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>	Controlador lógico programable

PSA	<i>Plataforma Solar de Almería</i>	
RO	<i>Reverse Osmosis</i>	Ósmosis inversa
ROC	<i>Ratio of Change</i>	Velocidad de cambio
RSE	<i>Referenced Single Ended</i>	Entrada con referencia común
RTD	<i>Resistance Temperature Detectors</i>	Detector de temperatura resistivo
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>	Control supervisor y adquisición de datos
SH	<i>Sample and Hold</i>	Muestreo y mantenedor
SO	Sistema Operativo	
SMD	<i>Solar Membrane Distillation</i>	Destilación solar por membranas
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>	Razón señal-ruido
TFG	Trabajo Fin de Grado	
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Bus serie universal
SH	<i>Sample and Hold</i>	Muestreo y mantenedor
VI	<i>Virtual instrument</i>	Instrumento virtual
VXI	<i>VME eXtension for Instrumentation</i>	VME extendido para instrumentación
WAN	<i>Wide Area Network</i>	Red de área amplia

Listado de imágenes

Imagen 1.1. Proceso de instalación del cuadro de control	2
Imagen 1.2. Versión de pruebas de la herramienta SCADA.....	3
Imagen 1.3. Centro Mixto CIESOL.....	4
Imagen 1.4. Plano general de ubicación de las instalaciones	6
Imagen 1.5. Campo solar en el tejado del Edificio Central y caseta de las instalaciones	6
Imagen 1.6. Configuración final del cuadro de control de la instalación.....	7
Imagen 1.7. Pantalla de sinóptico principal de la interfaz SCADA	8
Imagen 3.1. Estructura de una aplicación de control por computador	13
Imagen 3.2. Fuente de señal referenciada a masa (izquierda) y con referencia flotante (derecha).....	16
Imagen 3.3. Conjunto de relés para adaptar las entradas y salidas a 230V de RVA a 24V. Izquierda a derecha: Relé de maniobra, final de carrera abierto y final de carrera cerrado.....	16
Imagen 3.4. Datos de caudal de un ensayo realizado con filtro (rojo) frente otro a sin filtro (azul) para los caudalímetros F1 y F5	18
Imagen 3.5. Esquema general de un canal de entrada analógico (24)	19
Imagen 3.6. Entrada analógica diferencial. Empleando el canal 0 de una tarjeta de 8 entradas multiplexadas	20
Imagen 3.7. Entrada analógica con referencia común (RSE).....	20
Imagen 3.8. Entrada analógica sin referencia común (NRSE)	21
Imagen 3.9. Resultados de muestrear una misma señal a diferentes frecuencias (24)	21
Imagen 3.10. Estructura <i>Timed Loop</i> del programa <i>LabVIEW</i>	22
Imagen 3.11. Selección del <i>Time Sampling</i> desde la pantalla de configuración de lectura y escritura del SCADA	23
Imagen 3.12. Configuración del puerto de comunicaciones serie de la balanza de destilado	24
Imagen 3.13. Instrumentos tradicionales (izquierda) e instrumentos virtuales basados en software (derecha) (30).....	24
Imagen 3.14. Diseño inicial del circuito de la desaladora SolarSpring y el campo solar	25
Imagen 3.15. Esquema general de procesos de la planta desaladora	26
Imagen 3.16. Conjunto de captadores solares planos completo.....	27
Imagen 3.17. Circuito hidráulico del Campo Solar: Grupo Circo Mega 2725-N.....	27
Imagen 3.18. Esquema del proceso de desalación por membrana	29
Imagen 3.19. Esquema detalle del módulo de destilación por membrana	29
Imagen 3.20. Desaladora SolarSpring instalada y conectada al grupo hidráulico del Campo Solar.....	29
Imagen 3.21. Estructura del captador solar (33).....	30
Imagen 3.22. Curva de rendimiento (33)	31
Imagen 3.23. Pérdidas de carga para un captador y para 10 captadores conectados (33)	31
Imagen 3.24. Grupo de 3 captadores en serie y 4 grupos de captadores serie conectados en paralelo	32
Imagen 3.25. Esquema del Acumulador PSX/PSX-F (34).....	32
Imagen 3.26. Detalle de la posición de los sensores y del aislamiento térmico del tanque acumulador	32

Imagen 3.27. Detalle del distribuidor del grupo hidráulico	32
Imagen 3.28. Potencia disipada para los modelos AAS1V y AAS4V (35).....	33
Imagen 3.29. Potencia en función del porcentaje de glicol en el fluido caloportador (35)	33
Imagen 3.30. Pérdida de carga en relación al caudal (35)	33
Imagen 3.31. Instalación exterior del Aerotermo de la Serie “AAS4V”	33
Imagen 3.32. Principio de funcionamiento de la destilación por membrana	34
Imagen 3.33. Detalle de la membrana cilíndrica de la desaladora SolarSpring.....	34
Imagen 3.34. Detalle del depósito de destilado instalado sobre la balanza.....	35
Imagen 3.35. Diagrama de los lazos hidráulicos del campo solar	35
Imagen 3.36. Primer lazo: Configurado para la recirculación en los captadores solares	36
Imagen 3.37. Primer Lazo: Aumento de la temperatura en el tanque acumulador	36
Imagen 3.38. Primer Lazo: Disipación de calor del sistema empleando el circuito del Aerotermo	37
Imagen 3.39. Primer Lazo: Disipación de calor del sistema empleando el circuito del Aerotermo (V1 al 50%)	37
Imagen 3.40. Segundo Lazo: Distribución del caudal desde el tanque Acumulador	38
Imagen 3.41. Tercer Lazo: Temperatura y caudal fijo hacia la desaladora	38
Imagen 3.42. Conexión de la sonda a 4 hilos (Puente Wheatstone) (36)	39
Imagen 3.43. Pruebas de conexión de cuatro hilos de una sonda de temperatura de la planta.....	39
Imagen 3.44. Detalle de la instalación en ángulo de la sonda de temperatura T3.....	40
Imagen 3.45. Diagrama de funcionamiento del caudalímetro electromagnético (38)..	40
Imagen 3.46. Detalle del cableado del caudalímetro F1	41
Imagen 3.47. Diagrama relación entre el error en la medida y el caudal (37).....	41
Imagen 3.48. Detalle de la instalación del caudalímetro F2 (A.K.A. Q2).....	41
Imagen 3.49. Diagrama de cableado de una sonda de presión Cerebar T PMP131 (38)42	42
Imagen 3.50. Detalle de instalación del sensor de presión con serpentín de cobre	42
Imagen 3.51. Diagrama conceptual de medida inductiva de conductividad	43
Imagen 3.52. Diagrama detallado del sensor de conductividad y temperatura del CTI- 500 (39).....	43
Imagen 3.53. Detalle de la instalación del conductímetro CTI-500	44
Imagen 3.54. Esquema de montaje del interfaz RS-232 de la balanza (40).....	44
Imagen 3.55. Detalle de la tarjeta de interfaz serie	45
Imagen 3.56. Esquema de montaje del cable serie para la balanza (40)	45
Imagen 3.57. Montaje en fase de pruebas del conector DIN 7P	45
Imagen 3.58. Especificaciones del interfaz EIA RS-232C (40).....	45
Imagen 3.59. Formato de los datos en el interfaz RS-232C (40)	46
Imagen 3.60. Instalación de la balanza en la SolarSpring	46
Imagen 3.61. Curvas de consumo en relación al caudal solicitado (41)	47
Imagen 3.62. Curvas de pérdida de presión en función del caudal demandado (41) ...	47
Imagen 3.63. Instalación de la bomba P-1 modelo SOLAR 25-120	48
Imagen 3.64. Instalación de los variadores en el cuadro de alimentación	48
Imagen 3.65. Conexionado de control (42)	49
Imagen 3.66. Esquema de conexiones eléctricas para las válvulas de retención (43) ..	49
Imagen 3.67. Detalle de la instalación de la válvula de retención RVB	50

Imagen 3.68. <i>Switch</i> de configuración de las válvulas proporcionales (44).....	50
Imagen 3.69. Cableado de la válvula proporcional V1	51
Imagen 3.70. Esquema de funcionamiento del actuador AME 435 (44)	52
Imagen 3.71. Detalle de instalación de V5	52
Imagen 3.72. Configuración eléctrica del actuador AMZ 113 (45).....	53
Imagen 3.73. Detalle de instalación de la válvula V2	53
Imagen 3.74. Diagrama de funcionamiento de un relé.....	54
Imagen 3.75. Relés de control para la válvula de retención RVA	54
Imagen 3.76. Relés de control para la válvula de retención RVB.....	54
Imagen 3.77. Estructura hardware de la red.....	55
Imagen 3.78. Pirámide CIM (47).....	56
Imagen 3.79. Comparativa rendimiento/precio para el micro G3220.....	57
Imagen 3.80. Detalle de la placa base del computador SCADA	58
Imagen 3.81. Esquema del chasis cRIO-9074 (48).....	58
Imagen 3.82. Instalación del cRIO-9074 con todos sus módulos de E/S.....	59
Imagen 3.83. Esquema del chasis NI 9146 (49).....	59
Imagen 3.84. Instalación del NI 9146 con sus módulos de E/S	59
Imagen 3.85. Detalle del montaje del <i>switch</i> IES5100 en el cuadro de control.....	60
Imagen 3.86. Detalle de conexión de una fuente de señal en tensión (29).....	60
Imagen 3.87. Circuito de entrada del módulo NI 9221 (29).....	60
Imagen 3.88. Asignación de terminales del NI 9221 (29).....	61
Imagen 3.89. Detalle de conexión de una RTD a un canal del NI 9217 (51)	61
Imagen 3.90. Circuito de entrada del módulo NI 9217 (51).....	61
Imagen 3.91. Asignación de terminales del NI 9217 (51).....	62
Imagen 3.92. Detalle de conexión de dos sensores al NI 9203 (52)	62
Imagen 3.93. Circuito de entrada del módulo NI 9203 (52).....	62
Imagen 3.94. Asignación de terminales del NI 9203 (52).....	63
Imagen 3.95. Detalle de conexión de una carga a la salida del NI 9264 (53).....	63
Imagen 3.96. Circuito de salida del módulo NI 9264 (53)	63
Imagen 3.97. Asignación de terminales del NI 9264 (53).....	64
Imagen 3.98. Detalle de conexión de una entrada digital al NI 9375 (54).....	64
Imagen 3.99. Detalle de conexión de una salida digital al NI 9375 (54)	64
Imagen 3.100. Asignación de terminales del NI 9375 (54).....	65
Imagen 3.101. Configuración desde el MAX del cRIO-9074.....	66
Imagen 3.102. Configuración de la dirección IP del cRIO-9074	66
Imagen 3.103. Configuración desde el MAX del NI 9146	67
Imagen 3.104. Configuración de la dirección IP del NI 9146.....	67
Imagen 3.105. Configuración del puerto serie que utilizará la balanza	68
Imagen 3.106. Localización de Herramientas administrativas en Windows 7.....	69
Imagen 3.107. Orígenes de datos ODBC	69
Imagen 3.108. Administrador de orígenes de datos ODBC.....	69
Imagen 3.109. Selección de controlador para crear el nuevo origen de datos	70
Imagen 3.110. Configuración de ODBC Microsoft Access.....	70
Imagen 3.111. Configuración de la ventana Nueva base de datos	70
Imagen 3.112. Confirmación de Configuración de ODBC correcta	71
Imagen 3.113. Creación de archivo de conexión .udl	71
Imagen 3.114. Propiedades de vínculo de datos	71

Imagen 3.115. Prueba de conexión con la base de datos	72
Imagen 3.116. Pirámide de la automatización (5)	79
Imagen 3.117. Estructura interna de un sistema SCADA (I) (58)	80
Imagen 3.118. Estructura interna de un sistema SCADA (II) (58)	80
Imagen 3.119. Comparación entre un sistema con OPC y sin OPC (58)	82
Imagen 3.120. Detección en el MAX de los chasis cRIO-9074 y NI 9146	83
Imagen 3.121. Detalle del <i>switch</i> de configuración del cRIO-9074.....	83
Imagen 3.122. Módulos software instalados	84
Imagen 3.123. Esquema de funcionamiento del Scan Interface y FPGA (61)	85
Imagen 3.124. Detección de los chasis y todos los módulos instalados en ellos.....	86
Imagen 3.125. Ejemplo de empleo de las variables publicadas en modo <i>Scan Interface</i>	86
Imagen 3.126. Generación de aplicación .EXE en <i>LabVIEW</i>	87
Imagen 3.127. Elección de las VI que formaran parte del ejecutable de la aplicación..	87
Imagen 3.128. Configuración de propiedades para el VI	88
Imagen 3.129. Menú <i>Shared Variable Deployment</i>	88
Imagen 3.130. Generación del ejecutable 'CTRL_SolarDP_UAL.exe'	89
Imagen 3.131. Fases de desarrollo de la interfaz del SCADA (58).....	89
Imagen 3.132. Arquitectura jerárquica de la interfaz de pantallas.....	90
Imagen 3.133. Zonas de pantalla recomendadas (5)	92
Imagen 3.134. Empleo del <i>Tab Control</i> de <i>LabVIEW</i> en el menú principal.....	92
Imagen 3.135. Elemento de programación <i>Tab Control</i>	93
Imagen 3.136. Detalle de empleo del menú tipo <i>Ring Control</i> en el <i>Graph Menu</i>	93
Imagen 3.137. Icono Bomba OFF	95
Imagen 3.138. Icono Bomba ON.....	95
Imagen 3.139. Icono de Válvula de retención Cerrada	95
Imagen 3.140. Icono de Válvula de retención Cambiando de Estado.....	95
Imagen 3.141. Icono de Válvula de retención Abierta	95
Imagen 3.142. Icono de V2 OFF.....	95
Imagen 3.143. Icono de V2 ON.....	95
Imagen 3.144. Icono de Válvula proporcional.....	95
Imagen 3.145. Icono de Aerotermo OFF	95
Imagen 3.146. Icono de Aerotermo ON	95
Imagen 3.147. Icono del Acumulador	95
Imagen 3.148. Icono de alarma (ON)	95
Imagen 3.149. Icono de alarma (OFF)	96
Imagen 3.150. Icono de sonido activado (ON)	96
Imagen 3.151. Icono de sonido desactivado (OFF)	96
Imagen 3.152. Icono de cierre de la aplicación	96
Imagen 3.153. Gráficas de tendencia de los lazos de control	96
Imagen 3.154. Acción solicitada al operador tras dispararse la alarma T002.....	97
Imagen 3.155. Registro de la alarma T002 en <i>Alarm Log</i>	97
Imagen 3.156. Detalle de Sensor Status con todos sus sensores OK, aunque T002 esté disparada	98
Imagen 4.1. Icono de la aplicación CTRL_SolarDP_UAL	99
Imagen 4.2. Pantalla de acceso de usuarios.....	99
Imagen 4.3. Control Panel	100

Imagen 4.4. Detalle del selector de modo en MANUAL.....	100
Imagen 4.5. Pantalla de <i>Control Panel</i> en Modo Automático.....	101
Imagen 4.6. Detalle de Alarma T002	101
Imagen 4.7. Detalle de gráficas de tendencias del <i>Graph Menu</i>	101
Imagen 4.8. Pestaña de control de la desaladora SolarSpring.....	102
Imagen 4.9. Pestaña de lectura de los sensores de la desaladora <i>SolarSpring</i>	102
Imagen 4.10. Cronos del <i>Tools Menu</i>	102
Imagen 4.11. Medida de SNR en el <i>Tools Menu</i>	102
Imagen 4.12. Salida del programa SCADA.....	102
Imagen 4.13. Logo corporativo.....	102
Imagen 4.14. Detalle del indicador para el caudalímetro F1	103
Imagen 4.15. Tubería sin circulación de agua de proceso	103
Imagen 4.16. Tubería con circulación de agua de proceso	103
Imagen 4.17. Control de bomba P-1 parada	103
Imagen 4.18. Control de bomba P-1 funcionando	103
Imagen 4.19. Control del Aerotermo encendido	104
Imagen 4.20. Control de RVA cerrada	104
Imagen 4.21. Control de RVA conmutando (Cerrado<-->Abierto).....	104
Imagen 4.22. Control de RVA abierto.....	104
Imagen 4.23. Control de la válvula proporcional V1	104
Imagen 4.24. Control de V2 (OFF)	104
Imagen 4.25. Control de V2 (ON)	104
Imagen 4.26. Consejos y ayuda del elemento P-1	105
Imagen 4.27. <i>Automatic Control</i>	105
Imagen 4.28. <i>Process Control Graph</i>	106
Imagen 4.29. <i>Read & Write Configuration</i>	107
Imagen 4.30. <i>Data File Configuration</i>	107
Imagen 4.31. Detalle de la tabla EVENT de la base de datos del sistema SCADA.....	108
Imagen 4.32. <i>Alarms Configuration</i>	109
Imagen 4.33. Registro de alarmas de la pestaña <i>Alarm Log</i>	109
Imagen 4.34. Estado de los sensores en la pestaña <i>Sensor Status</i>	109
Imagen 4.35. Configuración de los sonidos del sistema en la pestaña <i>Sound Conf</i>	110
Imagen 4.36. Implementación de filtro en <i>LabVIEW</i>	115
Imagen 4.37. Implementación de filtro en <i>LabVIEW</i> (II)	115
Imagen 4.38. Implementación de filtro en <i>LabVIEW</i> (III)	116
Imagen 4.39. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F1	116
Imagen 4.40. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F2	117
Imagen 4.41. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F4	117
Imagen 4.42. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F5	118
Imagen 4.43. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F6	118
Imagen 4.44. Código en LabVIEW de la lectura de la balanza FG-150KAL.....	119
Imagen 5.1. Desaladora Aquaver instalada con el grupo hidráulico del Campo Solar	124

Listado de tablas

Tabla 1.1. Planificación temporal del proyecto.....	9
Tabla 3.1. Algunos transductores para la medida de fenómenos físicos.....	14
Tabla 3.2. Comparativa entre PLCs y PACs	18
Tabla 3.3. Propiedades físicas del compuesto DC20 (31).....	28
Tabla 3.4. Características del captador solar EURO L20 MQ AR (33).....	31
Tabla 3.5. Características principales del modelo de Aerotermo AAS4V (35)	33
Tabla 3.6. Precisión de la sonda Omnigrad TST90 con la temperatura (36)	39
Tabla 3.7. Tabla de colores según material transportado por las tuberías (59)	77
Tabla 3.8. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS.....	77
Tabla 3.9. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS (Continuación I).....	78
Tabla 3.10. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS (Continuación II)	79
Tabla 3.11. Pantallas y sus funciones de la herramienta SCADA	91
Tabla 3.12. Elección del color en el sistema	94
Tabla 4.1. Plan de pruebas: Primera Fase	111
Tabla 4.2. Plan de pruebas: Segunda Fase	112
Tabla 4.3. Evaluación de la herramienta SCADA	120
Tabla 4.4. Evaluación de la herramienta SCADA (Continuación)	121

Capítulo 1. Interés y objetivos

En zonas de clima árido, como la provincia de Almería, el agua es un bien precioso y finito, dados los períodos de sequía que han azotado la región (1). La única provincia europea que posee un desierto en su territorio, parece la candidata idónea para progresar e innovar, tanto en técnicas de mejora en el aprovechamiento del agua (ejemplo de ello es el riego por goteo), como en la depuración de aguas contaminadas o salobres. Y es en esta última faceta de la innovación hacia donde se encamina la investigación de la destilación mediante membranas (2).

Debido a la creciente preocupación por el cambio climático y las necesidades de reducción del consumo energético proveniente de fuentes no renovables, recientes investigaciones han mejorado los diseños iniciales de las plantas de desalación de membranas, incluyendo aporte de calor basado en energía solar, para elevar la temperatura del agua hasta el punto óptimo de operación (3).

1.1. Motivación del proyecto

Nadie puede poner en tela de juicio la necesidad vital que es para el ser humano el agua. Pero de toda el agua de la tierra sólo una pequeña porción es potable, el 70% del agua de la Tierra es agua de mar o aguas salobres. La idea principal que persiguen los procesos de desalación es aprovechar este enorme volumen de recursos acuíferos.

Existe una gran variedad de técnicas de desalación con tramos de aplicabilidad y eficiencia bastante diferentes para cada una de ellas. Por tanto, se persigue una coexistencia por encima de una sustitución.

La desalación mediante membranas es empleada en pequeñas instalaciones independientes debido a lo reducido de sus dimensiones y a que posee un bajo consumo, en comparación a otras técnicas. Este bajo consumo es debido principalmente a las bajas presiones que se necesitan para el proceso, lo que implica el uso de unas bombas de reducido tamaño. Como desventaja, el volumen de producción de destilado es también pequeño, no pudiendo compararse las producciones obtenidas con las correspondientes a otras técnicas, como por ejemplo la osmosis inversa o la destilación por vacío.

El proceso de desalación por membranas asistida por energía solar requiere un control exhaustivo, debido a la multitud de variables que intervienen en el mismo: temperatura, presión, caudales, masa de agua en los acumuladores, etc., y a la gran inercia de las variables principales. Al igual que cualquier proceso industrial, se debe llegar a un compromiso para alcanzar determinadas consignas (temperatura, presión, etc.) de la forma más eficiente posible. Debido al carácter experimental de la instalación, el número de sensores alcanza un nivel casi redundante. El motivo de ello es el empleo de la misma como banco de pruebas y ensayos tanto de técnicas avanzadas de desalación de agua, como del control asociado, ya que existen varios procesos dinámicos simultáneos que generan problemas de control bastante interesantes.

Por todo ello, es imperativo el desarrollo de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) que permita realizar un control fiable y flexible de la planta, una adquisición de todos los datos necesarios tanto del proceso de desalación como del control efectuado y proporcionar toda la información necesaria de forma intuitiva y precisa para un operador con pocas horas de formación.

Para lograrlo, todo el interfaz representará de forma esquemática una relación clara entre el proceso físico real y el sinóptico representado. Las variables y actuadores que intervengan en un mismo proceso aparecerán agrupadas y la navegación no poseerá elevado número de niveles jerárquicos donde un usuario pueda despistarse. Además, los dispositivos serán identificados de forma unívoca y tanto la funcionalidad como la interacción con los mismos será lo más natural posible para minimizar posibles errores humanos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto ha sido dotar a la planta experimental de desalación por membranas asistida por energía solar de un sistema SCADA. Recibe el nombre de SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition* o Control supervisor y adquisición de datos) cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo (4).

Para crear este Interfaz persona-máquina (HMI, *Human-Machine Interface*), las labores se han dividido en dos grandes fases: Primera fase de implementación física de la instalación de control y una segunda fase que abarca todo el desarrollo de la propia herramienta SCADA.

PRIMERA FASE - Instalación física: Consiste en dotar a la instalación de la instrumentación necesaria, formada por actuadores (motores, bombas, etc.) para realizar las acciones de control y sensores (sondas de presión, RTD, etc.) para capturar los datos generados durante el proceso. Para ello se ha llevado a cabo la instalación eléctrica de control para toda la planta, siendo centralizada por completo en el armario de control que alberga el controlador lógico programable (PLC) (ver Imagen 1.1), el cual, en última instancia, será el encargado de responder a las demandas del software SCADA.



Imagen 1.1. Proceso de instalación del cuadro de control

Las subtarefas de esta fase pueden enumerarse en:

- Diseño y construcción del cuadro de control.
- Elección de toda la aparamenta eléctrica de protección, así como fuentes de alimentación para los distintos sensores y cables específicos.
- Conexionado al cuadro de control de todos los sensores e interconexión del cuadro de control con el cuadro de alimentación.

- Instalación del PLC en el armario de control.
- Conexión de la red del sistema y configuración de todas las variables del sistema en el servidor OPC (OLE para control de procesos) de *National Instruments* (NI).

Para dar como finalizada esta primera fase, se confeccionó una versión inicial del SCADA, sin más funcionalidad que poder probar el correcto funcionamiento de los actuadores y sensores de toda la instalación, como se muestra en la Imagen 1.2.

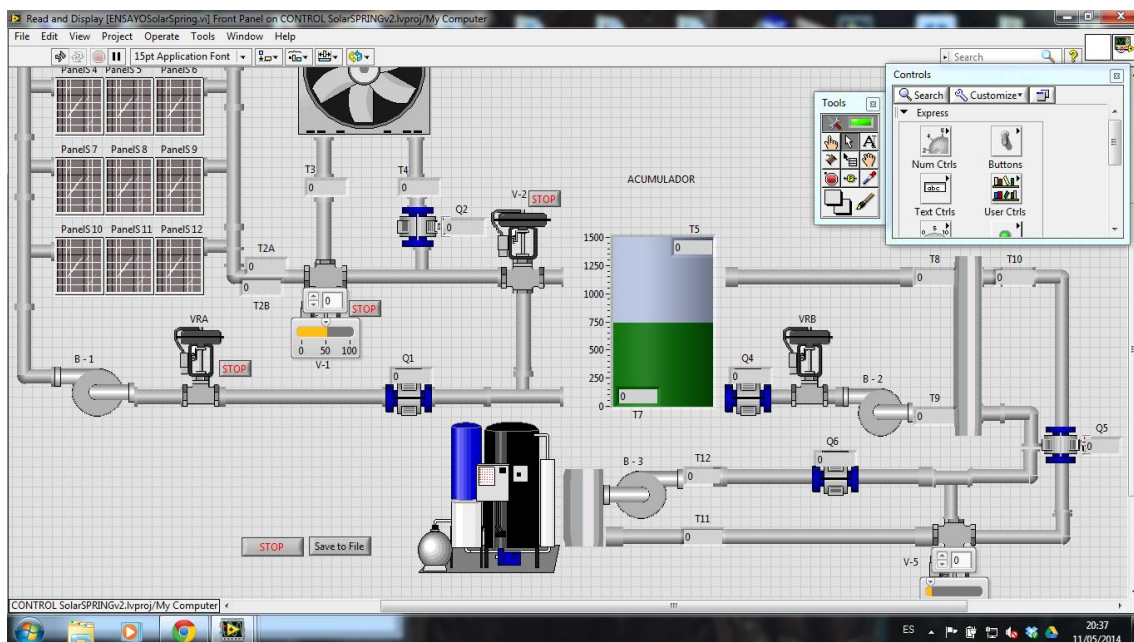


Imagen 1.2. Versión de pruebas de la herramienta SCADA

SEGUNDA FASE – Desarrollo del software: Detrás de esta herramienta se encuentran una serie de prestaciones que se han debido de observar y cumplir para alcanzar por completo el objetivo principal fijado. Dichas funcionalidades son:

- La monitorización en tiempo real de los datos de proceso a los operadores de la instalación.
- Adquisición de datos de los procesos en observación para un posterior análisis.
- La supervisión y mando para modificar el control establecido y, bajo ciertas condiciones anular o modificar tareas, evitando la supervisión humana continua.
- Visualización de los estados de las señales del sistema, tales como alarmas y eventos.
- Grabación de acciones o macros para agilizar operaciones, por ejemplo apertura de las válvulas de retención de las bombas cuando se desean accionar estas últimas.
- Garantizar la seguridad de los datos. Se ha creado una base de datos general con diversas tablas (Datos principales, Eventos y Alarmas) y de forma redundante se generan archivos en texto plano confeccionados con los datos necesarios en crudo para cada una de los ensayos de desalación.
- Escalabilidad. El sistema es ampliable con poco coste, de hecho en la actualidad se están empleando dos modelos de máquina de destilación MD en vez del único modelo proyectado.
- Garantizar la seguridad de los accesos, para ello se han creado tres perfiles de usuarios con diferentes privilegios de gestión dentro de la herramienta. Además, cada acción

ejecutada durante una operación, como por ejemplo, la atención a una alarma o el cambio de consigna, quedará registrado el usuario que la llevó a cabo (5).

- Asegurar la robustez del sistema frente a fallos o defectos de funcionamiento como a errores humanos.
- Debido al carácter multinacional de las instalaciones, uno de los requisitos fue emplear el inglés como idioma por defecto para el interfaz.

1.3. Contexto de desarrollo

Este trabajo se ha realizado en el contexto de las actividades del grupo de investigación TEP-197: Automática, Robótica y Mecatrónica que forma parte del Centro Mixto de investigación en Energía Solar CIESOL.

El centro CIESOL (Imagen 1.3) es un instituto mixto de investigación creado y gestionado entre la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) del Ministerio de Economía y Competitividad.



Imagen 1.3. Centro Mixto CIESOL

CIESOL es un centro de investigación creado y gestionado en base a un convenio de colaboración firmado en abril de 2005 entre la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería-CIEMAT. Está situado en el Campus Universitario de la Universidad de Almería y tanto el edificio que lo aloja como sus infraestructuras energéticas han sido financiados por fondos FEDER, la Junta de Andalucía y por el Proyecto Nacional de investigación de Carácter Singular y Estratégico sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar (ARFRISOL).

En el centro se realizan actividades de investigación y de transferencia tecnológica relacionadas con las aplicaciones de la energía solar en las siguientes áreas: la química sostenible, la regeneración de aguas, el análisis ambiental, el modelado y el control automático de instalaciones solares, la domótica orientada a la eficiencia energética, el frío solar y la evaluación de recursos solares.

CIESOL recoge la experiencia de más de 20 años de colaboración entre grupos de investigación de la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería en los cuales se ha consolidado un vínculo formal que en abril de 2005 quedó reflejado en la firma de un convenio entre ambas instituciones para la creación de una estructura estable en forma de centro de investigación conjunto. En su origen, la colaboración se centró en las áreas Química Solar y de

Control de Instalaciones Termo-solares y a través de la misma investigadores de la Universidad de Almería contribuyeron, por ejemplo, a la mejora de la capacidades analíticas de los laboratorios de la PSA o al diseño e implementación de sistemas SCADA específicos para diversos lazos y campos de ensayo de procesos solares térmicos de media y alta temperatura.

Con posterioridad se incorporaron actividades en el área de evaluación de recursos solares y, a partir de 2006, por la participación de la Universidad de Almería en el Proyecto Nacional de Carácter Singular y Estratégico sobre Arquitectura Bioclimática y Frío Solar ARFRISOL liderado por la Unidad de Eficiencia Energética en la Edificación del CIEMAT, se han añadido a las líneas de colaboración las de control orientado al confort térmico y al ahorro energético en edificios y el estudio de sistemas de refrigeración solar. Este proyecto ha permitido también contar con un conjunto de infraestructuras propias avanzadas dedicadas a garantizar la autosuficiencia energética del edificio.

En 2014 se incorpora la unidad funcional de Desalación y Fotosíntesis. Esta nueva unidad del CIESOL recoge la colaboración previa entre investigadores del Área de Ingeniería Química de la Universidad de Almería, que aporta 7 investigadores, y de la Unidad de Desalación Solar de la Plataforma Solar de Almería, que aporta 3 investigadores. Como aspectos particulares pueden citarse en primer lugar el hecho de que sus áreas de especialización son perfectamente integrables en las líneas de actuación del CIESOL y favorecerán la transversalidad y colaboración con el resto de unidades del centro y, en segundo lugar, que la nueva unidad acredita una contrastada y amplia experiencia en proyectos internacionales.

Aparte de esta colaboración directa entre investigadores, se han establecido a lo largo de este periodo diversos acuerdos para la financiación de becas y ayudas que han favorecido el acceso a las instalaciones de la PSA así como la formación especializada a decenas de estudiantes de la UAL, siendo uno de los resultados más relevantes del mismo la lectura de más de 20 tesis doctorales de alumnos de la UAL codirigidas por investigadores de la PSA y con uso de infraestructuras y recursos científicos de la misma.

La estructura funcional del centro está constituida por un comité de coordinación, órgano máximo de decisión y gestión, un equipo de dirección, al que pertenecen dos investigadores, uno por cada organismo matriz y un conjunto de 6 unidades que agrupan a los investigadores de las áreas temáticas específicas a efectos de promoción y gestión de proyectos y actividades en convocatorias públicas o en contratos con empresas. De forma suplementaria, el centro cuenta con comité evaluador externo que anualmente valora y supervisa la producción científica de sus diferentes unidades funcionales. En cuanto a su financiación, el centro cuenta con las asignaciones específicas vinculadas a cada uno de los proyectos y contratos en curso y con una aportación fija anual asumida de forma igualitaria por ambas instituciones para los gastos corrientes y de funcionamiento del centro.

Finalmente, el centro cuenta con una unidad de apoyo técnico a las infraestructuras científicas alojadas en el mismo, todas ellas de alto nivel y a disposición de los proyectos de investigación en las sus grandes áreas de trabajo, aplicaciones químicas de la energía solar y aprovechamiento térmico de la misma en los edificios e industrias (6).

Por una razón de logística las instalaciones de la desaladora no están albergadas dentro del edificio CIESOL, aunque el control remoto de las instalaciones se plantee hacer desde los laboratorios del grupo encargado de la desalación. Esta razón principal es la necesidad de un suministro constante de agua salada o marina.

Una solución comúnmente empleada cuando no se dispone de la proximidad del mar, es la creación artificial de la salmuera mediante la disolución de sal en agua corriente. Por fortuna, el emplazamiento privilegiado al lado de la costa de la Universidad de Almería, daba la posibilidad de poder obtener directamente mediante bombeo agua marina. Para ello se seleccionó como ubicación óptima para la instalación de desalación el edificio Central de la

universidad cuya localización relativa dentro del campus se muestra en las siguientes imágenes (ver Imagen 1.4).

Apoyándose en las instalaciones cercanas, empleadas para la investigación de microalgas, se utilizó un sistema de bombeo para elevar el agua marina hasta un depósito en el tejado del edificio Central. Es en el techo de este edificio el lugar concreto donde se hallan emplazados tanto los captadores planos del campo solar como el sistema de control y las unidades de desalación, albergadas estas últimas en la caseta aledaña (ver Imagen 1.5).

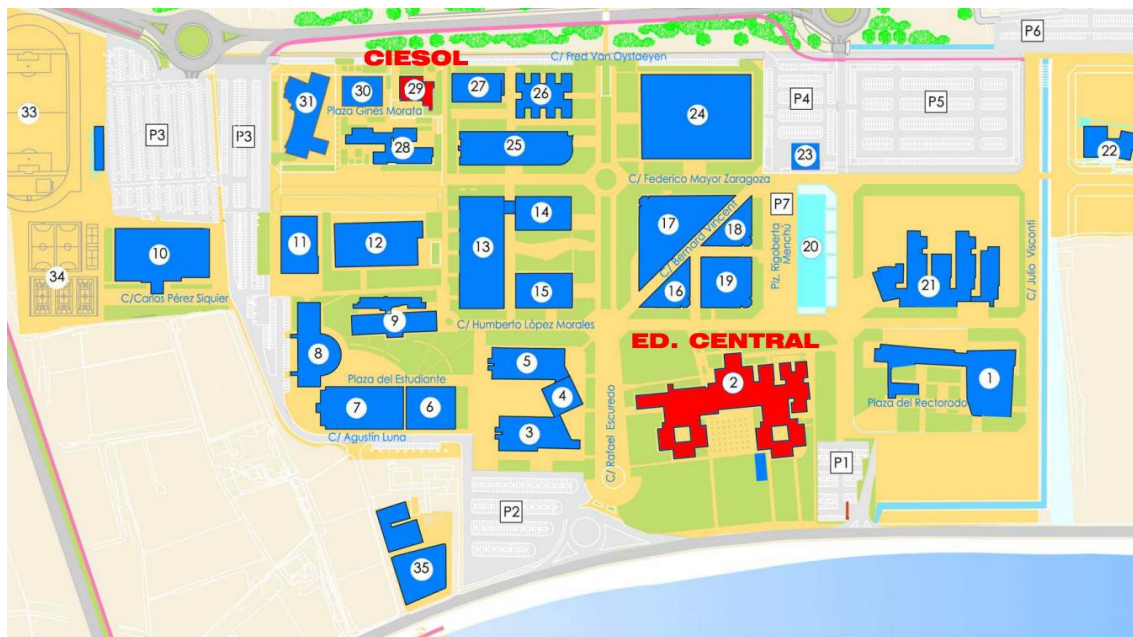


Imagen 1.4. Plano general de ubicación de las instalaciones



Imagen 1.5. Campo solar en el tejado del Edificio Central y caseta de las instalaciones

1.4. Resumen de resultados

Crear algo nuevo y que funcione es una función que difícilmente puede darse fuera de una disciplina ingenieril y, por norma general, su grado de éxito sólo puede medirse de forma binaria entre los estados éxito y fracaso: si funciona es un éxito y si no, un fracaso.

El resumen de los resultados de este proyecto se podrían calificar, sin caer en la autocomplacencia, de exitosos fuera de toda duda. Se ha llevado un diseño de la teoría a la práctica, afrontando y resolviendo todos y cada uno de los problemas derivados de la consecución del objetivo marcado. Aunque, como se desarrollará más adelante, nuevos trabajos y propuestas de mejora quedan pendientes para trabajos futuros.

La instalación física en la planta de todos los sensores y actuadores es una realidad. Todas las medidas de los instrumentos electrónicos han sido contrastadas con otros instrumentos portátiles y problemas que se describirán en capítulos posteriores de esta memoria, como el ruido presente en las lecturas de los caudalímetros electromagnéticos, se resolvieron de forma satisfactoria. La imagen 1.6 muestra la configuración del cuadro de control de la instalación.



Imagen 1.6. Configuración final del cuadro de control de la instalación

Se ha desarrollado una herramienta robusta e intuitiva para los usuarios de las instalaciones empleando el software *LabVIEW* de la marca *National Instruments*. Dicho software cumple con todos los objetivos pedidos de funcionalidad y, a día de hoy, acumula un elevado número de ensayos y horas de funcionamiento, dando como fruto los valiosos datos que están empleándose actualmente en la continua mejora e investigación de la técnica de desalación con membranas asistida por energía solar (ver Imagen 1.7).

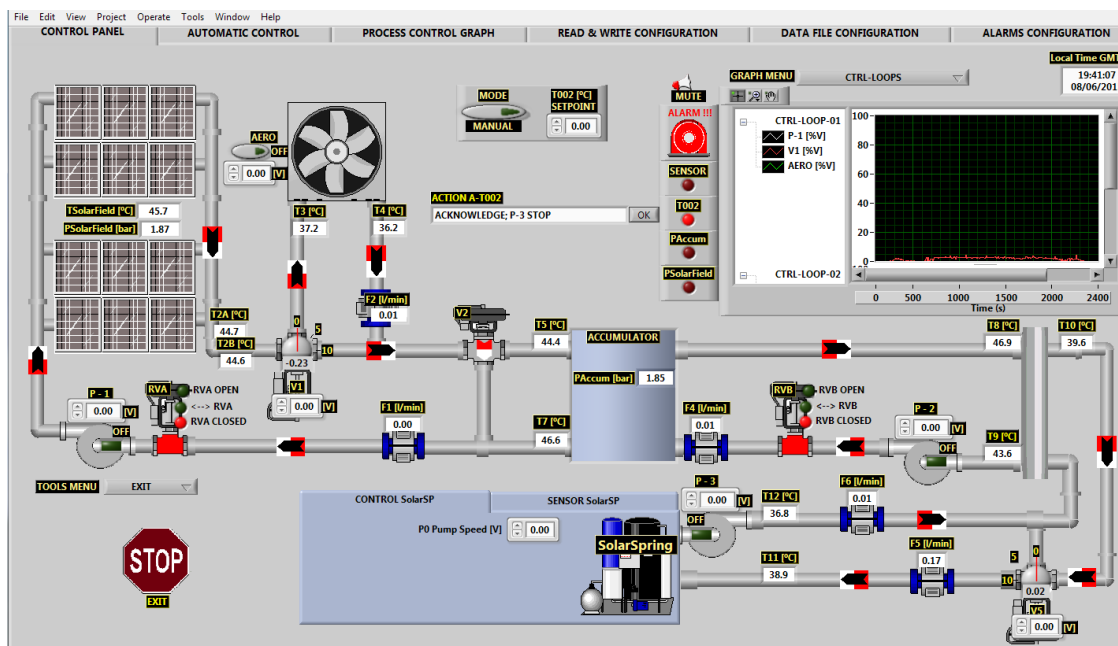


Imagen 1.7. Pantalla de sinóptico principal de la interfaz SCADA

1.5. Planificación temporal

Para poner en contexto la planificación temporal de este trabajo se debe tener en cuenta lo siguiente: En un principio este proyecto iba a ser meramente teórico. Se planteaba abordar tan sólo el desarrollo y programación de la herramienta SCADA, teorizando sobre el conjunto y tipo de sensores y actuadores necesarios y fijando las bases de un interfaz para llevar a cabo el control y adquisición de datos de la misma. Pero a los pocos meses de desarrollo inicial, concretamente en Mayo del 2014, comenzaron los trabajos de las instalaciones, poder realizar la implementación al completo de la planta pasaba a ser una realidad.

Aunque gran parte de las tareas se podían realizar de forma paralela, fue necesario en más de un período suspender o aplazar trabajos en la parte de control por diversos motivos (logística de distribución del material, necesidad de instalar nuevas zonas de la planta, averías de componentes y un largo etcétera).

Desde el punto de vista del control de las instalaciones se llevó a cabo el desarrollo de la herramienta SCADA en dos fases bien diferenciadas: Una primera donde la herramienta era un sinóptico básico del proceso sin funcionalidades de alto nivel como: base de datos, realimentación de los actuadores, etc., donde la prioridad era poder controlar y observar desde el computador tanto la planta de desalación como el campo solar. Durante esta primera fase el esfuerzo se centró en la instalación física de todos los actuadores y sensores presentes en la planta.

La segunda fase arrancó solucionando problemas de más alto nivel, como filtrado de ciertos sensores o añadiendo nuevos equipos de medida que no estaban contemplados en el proyecto de la planta inicialmente; para terminar por incluir todas las funcionalidades del sistema SCADA que describiremos en los capítulos siguientes.

Como fase final se llevó a cabo la puesta en marcha de la instalación al completo, con todo tipo de pruebas y ensayos para asegurar el correcto funcionamiento de toda la planta. De una forma más detallada se muestra en la siguiente tabla la temporización concreta de cada actividad desarrollada (ver Tabla 1.1).

FECHA	ACTIVIDAD	DURACIÓN
Marzo-Abril 2014	Estudio y profundización en el lenguaje y entorno de programación <i>LabVIEW</i> .	15 días
	Análisis teórico sobre el proceso de la planta de destilación MD y el campo solar.	15 días
Mayo 2014	Selección y adquisición de toda la paramenta eléctrica necesaria para la instalación (cables, F.A., carril DIN, etc.)	20 días
	Conexión de los sensores y actuadores de la instalación.	5 días
Junio 2014	Elaboración de un SCADA de prueba y sistema de guardado de variables básico.	5 días
	Puesta en marcha y pruebas de la instalación.	5 días
	Solución de problemas con los módulos digitales (activación y desactivación de las variables de forma aleatoria).	15 días
Julio 2014	Adaptación del SCADA a cambios en la planta y mejoras.	10 días
	Solución de problemas en las lecturas de los caudalímetros electromagnéticos.	15 días
Diciembre 2015	Inclusión de una balanza en el sistema.	5 días
	Solución de un problema con la adquisición de pesada en el puerto serie.	15 días
Enero 2015	Solución de un problema con <i>LabVIEW</i> en tiempo de programación.	30 días
Abril 2015	Inclusión en el SCADA de un sistema completo de alarmas.	10 días
	Mejora del sistema de archivos con la inclusión de una Base de datos principal para gestionar toda la instalación.	5 días
	Inserción de los tres perfiles de usuarios básicos (Invitado, Operador y Administrador).	5 días
	Mejora del interfaz gráfico e inclusión de gráficas de tendencia.	10 días
Mayo 2015	Inicio de la redacción de la memoria del TFG.	10 días
	Corrección de los últimos detalles de la interfaz.	5 días
Junio 2015	Finalización de la memoria del TFG.	10 días

Tabla 1.1. Planificación temporal del proyecto.

De esta manera se concluye que se han dedicado 210 días a la realización de este TFG, es decir, 7 meses de trabajo. Si se promedia a 8 horas por día empleado en el desarrollo del mismo, se obtiene una duración total de 1680 horas de trabajo intenso, aunque gratificante.

1.6. Estructura de la memoria del TFG

La estructura de esta memoria se compone de cinco capítulos, encontrándose en este primer capítulo la introducción y resumen de actuaciones contempladas en el resto del documento.

En el segundo capítulo se expone la revisión bibliográfica que se ha llevado a cabo en la literatura científica relacionada con este tipo de instalaciones. Cabe destacar que, debido a que se trata de una tecnología no implantada industrialmente, existen pocos trabajos que describan actividades similares a las que se han llevado a cabo en este trabajo fin de grado. Por ese motivo, la extensión de ese capítulo es limitada, aunque se ha intentado plasmar brevemente las iniciativas que existen a nivel internacional sobre el tema, dejando al lector interesado la lectura en profundidad de las referencias que se han incluido en dicho capítulo.

En el tercer capítulo se exponen de forma breve los conceptos de instrumentación y control por computador, para dotar al lector de cierta perspectiva sobre conceptos que se manejan en capítulos posteriores. Este capítulo también alberga una descripción exhaustiva sobre toda la planta desde diferentes puntos de vista. Desde un nivel conceptual y de funcionamiento, descripción detallada de todos los elementos del sistema tanto de medida, como de actuación; hasta llegar a un análisis de la arquitectura hardware y software que sustenta todo el complejo. El capítulo continúa con el detalle de las especificaciones del diseño de la herramienta SCADA. Comienza con los requisitos técnicos del proyecto, para concluir repasando toda la normativa y guías de desarrollo. Finalmente, se describe en profundidad todo el diseño del software implementado, así como una descripción de las herramientas empleadas para su confección.

El cuarto capítulo está dedicado a resultados, donde se mostrará el funcionamiento y descripción del SCADA. Un gran bloque central que analiza y repasa las soluciones alcanzadas para los problemas más relevantes que se han producido en la puesta en marcha de la instalación.

El capítulo final, el número cinco, contiene las conclusiones de todo este trabajo así como propuestas de mejora y trabajos futuros.

Capítulo 2. Revisión bibliográfica

La destilación por membranas con apoyo de energía solar (SMD, *Solar Membrane Distillation*) es una tecnología que se encuentra actualmente en proceso de investigación para cubrir requerimientos moderados de agua en zonas con buenas condiciones de radiación solar (7), (8). La coincidencia entre la escasez de agua y la disponibilidad de radiación solar hace que la energía solar sea la opción más adecuada para mitigar el déficit de agua (3), (9), (10), (11), (12), (13). Las principales ventajas de esta tecnología son (14), (15):

1. Baja temperatura de operación (60-90 °C).
2. Bajos requisitos de mantenimiento.
3. Puede ser fácilmente acoplada a tecnologías solares bien establecidas.

Sin embargo, la tecnología SMD no se ha aplicado a nivel industrial, debido fundamentalmente a dificultades en el diseño de la membrana, humectación de sus poros, el control del flujo másico y la incertidumbre asociada a sus costes energéticos y económicos (16), (17).

La destilación por membrana es un proceso de separación impulsado térmicamente (9), producido en una membrana porosa hidrofóbica. Debido al establecimiento de una diferencia de presión de vapor entre los dos lados de la membrana, se induce un flujo de moléculas de vapor, mientras que los componentes no volátiles son rechazados. Las investigaciones recientes sobre las tecnologías SMD se centran en la evaluación, por medio de campañas experimentales, de diferentes tipos de diseños y configuraciones (3), (15), (17), (18), (19), (20). Los parámetros más relevantes que se estudian para evaluar el rendimiento de módulos MD son la producción de destilado, el consumo específico de energía térmica y la eficiencia térmica. Para llegar a conclusiones relevantes a través de estos estudios, se deben mantener en estado estacionario o cuasi-estacionario las variables principales que intervienen en el proceso (temperaturas del agua procedente de la fuente fría y caliente y los flujos másicos asociados). Sin embargo, debido a la variabilidad de la radiación en su ciclo solar o debido al paso de nubes, es complicado controlar dichas variables incluso disponiendo de operadores cualificados. Este hecho puede dar lugar a la extensión temporal indeseable de las campañas experimentales o a la necesidad de utilizar fuentes de energía no renovables para cubrir los requisitos de la operación.

Hay muy pocos trabajos relacionados con la automatización y diseño de sistemas SCADA para plantas SMD. En (16) se incluye una visión general de enfoques de modelado, junto a una descripción de las variables de operación que afectan al proceso MD y los pasos que hay que llevar a cabo para controlar el sistema en diferentes configuraciones. En (21) se desarrolla una biblioteca visual en entorno Matlab para el diseño y simulación de distintos tipos de sistemas de desalinización solar. En (22), (23) se presenta un modelo dinámico de simulación de un sistema SMD usando *Aspen Custom Modeler* basado en balances de transferencia de masa y energía. A través de este modelo se estudian los efectos que sobre el comportamiento de la planta provoca la adopción de distintas funciones objetivo, cambios en la radiación solar, configuraciones de tanques de almacenamiento y el efecto de modificar el caudal en el módulo MD y en los tanques de almacenamiento.

El sistema SCADA más parecido al que se presenta en este trabajo se desarrolló en (13), donde también utilizaron *LabVIEW* para el desarrollo de una herramienta SCADA para el control de sistemas SMD, sin incluir detalles sobre la instalación.

Capítulo 3. Material y métodos

3.1. Instrumentación y control por computador

En la actualidad, el uso de computadoras, entendiéndolas como cualquier dispositivo hardware dotado de un microprocesador, se ha extendido prácticamente a todas las disciplinas tecnológicas. Científicos e ingenieros utilizan instrumentos y computadoras para observar, controlar y comprender los fenómenos físicos o realizar el control de procesos y máquinas en la industria.

En este capítulo se revisarán los conceptos básicos relativos a la instrumentación y control por computador.

3.1.1. Estructura de una aplicación de instrumentación y control por computador

El fin último de las aplicaciones de instrumentación y control es recoger datos de un sistema físico y, a partir del análisis de éstos, actuar sobre el sistema a partir de una serie de órdenes de control. Los fenómenos producidos en el sistema físico que se desea monitorizar y controlar son captados por los sensores, que a través de los correspondientes transductores obtienen señales eléctricas a partir de magnitudes como temperatura, presión, caudal, etc. Estas señales son acondicionadas para facilitar su lectura por la electrónica de adquisición de datos en el computador. Esta electrónica puede ir desde una tarjeta de adquisición de datos conectada al bus interno del computador o una de sus interfaces (USB, *Firewire*), a instrumentos externos que se comunican con el ordenador mediante distintos buses y protocolos como GPIB, VXI, serie RS-232, TCP/IP, etc. En el caso particular de este proyecto se emplearán estos dos últimos. Mediante el software adecuado, estos datos pueden ser analizados y visualizados, proporcionando una interfaz al operador humano, que a su vez puede interactuar con la aplicación. Cuando los cálculos para el análisis son complejos, se puede disponer de una electrónica de análisis específica para el procesamiento matemático de los datos. Además, también es habitual realizar un control sobre el sistema a partir del análisis, para lo cual se utiliza la electrónica de adquisición que, mediante salidas analógicas o digitales, puede actuar sobre el proceso (por ejemplo encender o apagar una bomba, incluso fijar su velocidad de bombeo) (24).

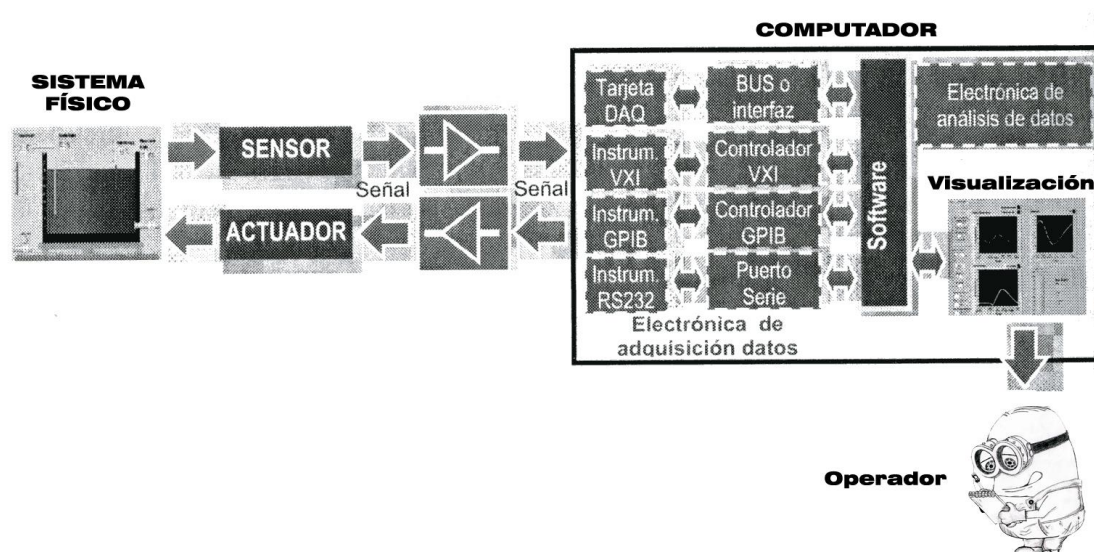


Imagen 3.1. Estructura de una aplicación de control por computador

3.1.2. Sensores y transductores

De todos los componentes que forman parte de un sistema de medida, el sensor y/o transductor es la fuente de información más crítica, ya que es el instrumento que realiza la medición de la magnitud física y se ve afectado por las interferencias ambientales y físicas del propio sensor o del sistema en cuestión. Conociendo las características del sensor y sus restricciones en el medio ambiente, se puede minimizar la diferencia entre la percepción y la magnitud real. Es importante diferenciar entre sensor y transductor, ya que son términos que a menudo se confunden:

- Sensor: Elemento de un sistema de medida que es afectado directamente por el fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a ser medida.
- Transductor: Dispositivo usado en mediciones, que hace corresponder una magnitud de entrada a una magnitud de salida según una relación determinada.

Habitualmente, el transductor mide el fenómeno físico y suministra una señal eléctrica que puede ser leída por el sistema de adquisición. Por ejemplo, un termopar.

FENÓMENO FÍSICO	TRANSDUCTORES ASOCIADOS
TEMPERATURA	Termopares
	RTDs (<i>Resistance Temperature Detectors</i>)
	Termistores (NTC o PTC)
	Bimetales
	Circuitos integrados
LUZ	Fotodiodos
	Fototransistores
	Fotorresistencias (LDR)
	Células fotoeléctricas
SONIDO	Micrófonos
POSICIÓN LINEAL O ANGULAR	Codificadores ópticos
	Potenciómetros
DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACIÓN	Transformadores diferenciales de voltaje lineal (LVDTs)
	Galgas extensiométricas
FUERZA Y PRESIÓN	Galgas extensiométricas
	Transductores piezoeléctricos
	Células de carga
CAUDAL	Caudalímetros de flujo rotativo
	Caudalímetros electromagnéticos
HUMEDAD	Sales higroscópicas
	De conductividad (resistivos)
	Capacitivos
	Infrarrojos

Tabla 3.1. Algunos transductores para la medida de fenómenos físicos

Principalmente, se puede distinguir entre dos tipos de transductores:

- Activos: Son aquellos que generan a su salida una señal eléctrica a partir de la magnitud que miden sin necesidad de alimentación eléctrica externa. Estos dispositivos aprovechan la energía de la propia magnitud física a medir para generar la salida. Ejemplos son los basados en los fenómenos termoelectrónico (generación de una variación de tensión a partir de una variación de temperatura), piezoeléctrico (variación de carga electrostática

producida por un esfuerzo mecánico) o fotovoltaico (generación de una variación de corriente a partir de la luz).

- Pasivos: Son aquellos que bajo la acción de la magnitud física que quiere medirse varía su impedancia (resistivos), inductancia (inductivos) o capacidad (capacitivos). Para obtener una señal eléctrica (en tensión, corriente o frecuencia) a partir de ellos es necesario insertar un circuito convertidor de medida, que necesita de una fuente de alimentación externa. La práctica totalidad de los transductores que conforman los sensores instalados en la planta son de tipo pasivo.

3.1.3. Tipos de señales

Una señal es una variable física tal que su magnitud o su variación en el tiempo contiene información. Con el fin de poder medirla mediante un sistema basado en computador, la señal ha de convertirse a una señal eléctrica, para lo cual se utilizan los transductores descritos con anterioridad. La señal eléctrica puede contener la información a partir de alguno de sus parámetros: amplitud, forma, frecuencia, etc. Emplearemos sólo dos criterios de clasificación para describir las señales: Atendiendo a su naturaleza y teniendo en cuenta la referencia de la misma.

Atendiendo a la naturaleza de la señal se puede hacer la siguiente clasificación:

- Señales Digitales: Son aquellas que poseen un número finito de estados discretos potencia de dos. Las más habituales son las señales binarias con dos estados: Nivel alto, '1' lógico u ON; que en nuestra instalación se corresponderá con un valor de tensión de 24V y un Nivel bajo, '0' lógico u OFF; que dispondrá su umbral en 0V. Existen numerosos estándares que definen los niveles de tensión para cada estado, márgenes de ruido, etc. para cada una de las denominadas familias lógicas TTL, CMOS, etc. El protocolo RS-232 empleado en la balanza de la instalación emplea este tipo de señales, además de las numerosas señales de activación y desactivación presentes en todo el complejo y que se describirán más adelante.
- Señales Analógicas: Este tipo de señales contienen información en toda su variación a lo largo del tiempo. Las señales analógicas pueden ser de tipo DC (*Direct Current*), variables en el dominio temporal y variables en el dominio de la frecuencia. Las instalaciones tratadas en este proyecto sólo hacen uso del primer tipo enumerado. Las señales en DC se mantienen estáticas o varían muy lentamente en el tiempo, y la información de interés es función de la amplitud o nivel de la misma en un instante determinado. Para su medida, el ancho de banda requerido será bajo. Buen ejemplo de ello es la medida de una magnitud como la temperatura, la cual presenta una gran inercia y por tanto sus variaciones son, por lo general, lentas.

Si se tiene en cuenta la referencia de la señal, se puede distinguir entre señales referenciadas a masa y señales diferenciales:

- Fuentes de señal referenciadas a masa. En estas fuentes las señales de tensión están referenciadas a la masa del sistema, en este caso a la tierra de la línea de control instalada en el Edificio Central. Todas las fuentes de señal de este tipo comparten la masa con el instrumento de medida. Hay que hacer notar que las masas de dos fuentes de señal referenciadas a masas independientes no suelen tener el mismo potencial. Si la diferencia de potencial es muy acusada, se produce un fenómeno conocido como bucle de masa y puede acabar por dañar los instrumentos de medida (ver Imagen 3.2 izquierda).
- Fuentes de señal flotantes. En una fuente de señal diferencial, el voltaje no está referenciado a ninguna masa común. Algunos ejemplos de fuentes diferenciales se

encuentran en los amplificadores de aislamiento que implementan algunos de los módulos de adquisición de datos con los que cuenta la planta (ver Imagen 3.2 derecha).

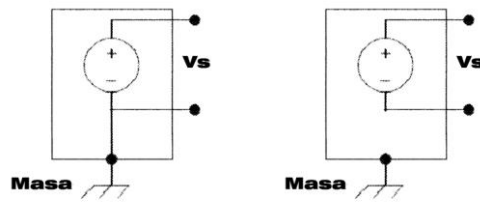


Imagen 3.2. Fuente de señal referenciada a masa (izquierda) y con referencia flotante (derecha)

3.1.4. Acondicionamiento de señal

El acondicionamiento de señal es el proceso de medir y manipular señales para mejorar su precisión, aislamiento, filtrado, etc. Para medir señales de transductores, éstas deben convertirse a un formato que acepte el instrumento o electrónica de adquisición de datos. Por ejemplo, las válvulas de retención RVA y RVB en la instalación poseen dos salidas para indicar los finales de carrera entre abierta y cerrada pero a 230V. Para compatibilizar dichas señales con nuestras entradas digitales disponibles en el módulo de 24V, surgió la necesidad de emplear relés electromecánicos para realizar la adaptación (ver Imagen 3.3).



Imagen 3.3. Conjunto de relés para adaptar las entradas y salidas a 230V de RVA a 24V. Izquierda a derecha: Relé de maniobra, final de carrera abierto y final de carrera cerrado

Los tipos más comunes de acondicionamiento de señal son la amplificación, linealización, aislamiento y filtrado.

3.1.4.1. Amplificación

La amplificación es el tipo más común de acondicionamiento de señal, dado que mejora la precisión de la señal digitalizada resultante y reduce los efectos del ruido.

Para aumentar la relación señal ruido (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) en señales de muy poca tensión es conveniente utilizar amplificadores situados lo más cerca posible de la fuente de señal (25) (24). Lo ideal es amplificar la señal de manera que el rango de tensión sea igual al rango máximo de entrada del convertidor analógico a digital del dispositivo de adquisición.

Si la amplificación se hace en el dispositivo de adquisición, la señal se digitalizaría con el ruido inducido en los cables de conexión, lo que reduciría la SNR. Sin embargo, si se amplifica la señal próxima a la fuente, el ruido tiene un efecto mucho menos destructivo en la señal, y la representación digitalizada es mucho más fiel a la señal original.

Para reducir al mínimo los problemas derivados de un entorno ruidoso en la instalación se han seguido una serie de pautas:

- Se han utilizado cables apantallados y/o de par trenzado para tratar de aislar nuestro sistema de medida.
- Todas las longitudes de los cables son las mínimas necesarias. De esta forma el ruido inducido se ve minorado debido a que el dipolo $\lambda/2$ resultante de la antena, que es al fin y al cabo un cable, reduce el espectro de frecuencias que lo afectan, aparte de la obvia ventaja que representa la reducción de la impedancia serie del cable (25).
- Se ha procurado en toda la instalación diferenciar y aislar, en la medida de lo posible, los cables de alimentación de alterna y otros aparatos que inducen ruido a la frecuencia de la red de baja tensión (50 Hz). Para ello existen dos líneas independientes de alimentación, una para el cuadro de control con toda la instrumentación y otra línea que va al cuadro de alimentación donde se encuentran las fuentes de alimentación, variadores, etc. En resumen, se trata de aislar la electrónica de potencia de la electrónica de pequeña señal.

3.1.4.2. Linealización

Muchos transductores que componen los sensores de nuestra instalación no tienen una respuesta lineal a los cambios del fenómeno físico que miden. Es por ello que se realiza un proceso de linealización mediante módulos hardware, la mayoría integrados en el propio sensor, o bien mediante algoritmos en el software de la aplicación SCADA.

3.1.4.3. Aislamiento

De forma habitual y por motivos de seguridad, se suelen aislar las señales del transductor del computador o dispositivo de adquisición. Por ejemplo, en caso de que la señal a monitorizar contenga picos altos de tensión que puedan dañar al computador o incluso al operador se debe emplear aislamiento.

El aislamiento se utiliza asimismo para asegurar que las diferencias en los potenciales de masa no afectan a la electrónica de adquisición. Cuando el dispositivo de adquisición y la señal no están referenciados a masas con el mismo potencial se puede producir un bucle de masas como ya se ha descrito anteriormente. Estos bucles pueden causar una representación imprecisa de la señal de medida. Además, si la diferencia de potencial entre la masa de la fuente y de la electrónica de adquisición es muy grande, se pueden producir daños irreparables en el sistema de medida.

3.1.4.4. Filtrado

Los circuitos de acondicionamiento se utilizan también para filtrar señales no deseadas. Estos circuitos suelen incorporar filtro paso-bajo con el fin de eliminar señales de alta frecuencia que puedan ocasionar lecturas de datos erróneas. Gracias al comportamiento del ruido, de carácter aleatorio y rápida variación, es el tipo de señal de alta frecuencia ideal, que se pretende eliminar aplicando este tipo de filtros (26). Como se verá más adelante y de forma detallada, fue necesario el empleo de un filtrado de este tipo en la obtención de la lectura de los caudalímetros del campo solar (ver Imagen 3.4).

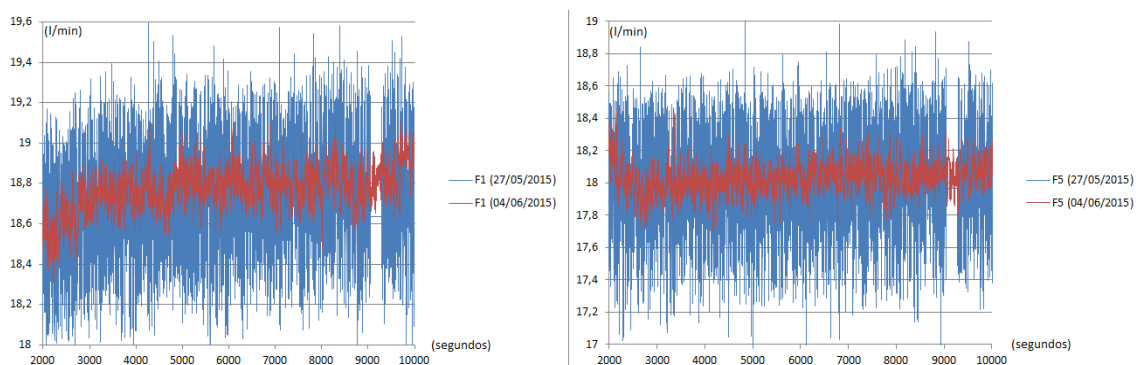


Imagen 3.4. Datos de caudal de un ensayo realizado con filtro (rojo) frente otro a sin filtro (azul) para los caudalímetros F1 y F5

3.1.5. Electrónica de adquisición de datos

En la actualidad existen numerosos tipos de sistemas de adquisición de datos y control. Los *Data Loggers* son sistemas que operan de forma independiente para la captura de datos de campo, que posteriormente se descargan a un computador para su análisis. Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ, *Data Acquisition*) necesitan un PC para su funcionamiento al cual conectarse empleando algún bus interno del mismo.

También existen controladores compactos que incorporan, además de la electrónica de adquisición, generación y acondicionamiento de señal, microprocesadores para realizar aplicaciones de análisis y control. Tal es el caso de los autómatas programables o PLCs clásicos y de los controladores de automatización programables (PAC).

PAC se denomina al conjunto formado por un controlador (una CPU típicamente), módulos de entrada y salida, y uno o múltiples buses de datos que lo interconectan todo. Los dispositivos que empleados en las instalaciones son de este último tipo, concretamente: un modelo *CompactRIO* de NI y que se describirá en detalle en el capítulo 3, cuando se exponga el hardware involucrado (24).

Las diferencias principales entre los clásicos PLCs y los nuevos PACs se pueden apreciar en la siguiente tabla:

PAC (<i>Programmable Automation Controller</i>)	PLC (<i>Programmable Logic Controller</i>)
Procesamiento distribuido.	Procesamiento basado en ciclo de sondeo continuo (<i>continuous scanning</i>).
Multitarea.	La programación y funciones se suelen modelar con circuitos de relés.
Lógica basada en excepciones.	Lógica basada en diagrama de contactos (<i>Ladder</i>).
Sistemas de comunicación basados en protocolos y estándares abiertos.	Sistemas de comunicación en muchos casos propietarios.
Funciones avanzadas de procesamiento y tratamiento de señales.	

Tabla 3.2. Comparativa entre PLCs y PACs

3.1.5.1. Entradas y salidas analógicas

El bloque de entradas y salidas analógicas es uno de los más importantes. En la siguiente figura se muestra la estructura típica de estas entradas y que se verá reflejada en los diagramas de los módulos de adquisición de NI. Como puede observarse, es habitual que todos los canales de entrada se multiplexen por economía, aunque es posible encontrar tarjetas de altas prestaciones en las que se dispone de un amplificador y un convertidor A/D para cada entrada

(con el correspondiente aumento de precio implícito). A continuación se dispone de un amplificador de ganancia programable, utilizado para adecuar el nivel de la señal de entrada al convertidor para aprovechar todo su rango. Los siguientes bloques son un filtro *anti-aliasing*, con el objetivo de eliminar las frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo, un circuito de muestreo y retención (SH, *Sample and Hold*) y un convertidor analógico-digital (A/D). Finalmente, las muestras adquiridas se almacenan en la tarjeta en una memoria FIFO (*First-In First-Out*) (24).

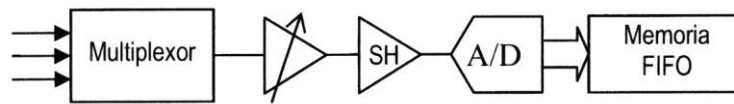


Imagen 3.5. Esquema general de un canal de entrada analógico (24)

Las entradas analógicas se pueden configurar y conectar a la fuente de señal como entradas diferenciales, referenciadas a un punto o no referenciadas con masa común. Pero antes de comenzar con la descripción de las mismas se comentarán brevemente características comunes y que son de gran importancia en los sistemas de adquisición:

Modo Común: Una entrada diferencial ideal responde sólo a la diferencia de potencial entre sus terminales positivo y negativo. El voltaje en modo común es cualquier voltaje que se mide respecto a la masa del amplificador de instrumentación y está presente en ambas entradas. El rechazo del voltaje en modo común es importante para eliminar los ruidos que a menudo se introducen en el cableado en forma de voltaje en modo común (27), (28).

Voltaje en Modo Común: El rango de voltaje en modo común limita el rango de voltaje de la entrada respecto a la masa del sistema de medida. Si se sobrepasan estos voltajes se producirán errores en las medidas e incluso daños en los componentes del dispositivo. El voltaje en modo común se calcula según la fórmula:

$$V_{CM} = \frac{(V_+ + V_-)}{2}$$

Donde V_+ y V_- , son los voltajes en los terminales (+) y (-) del amplificador de instrumentación respecto a la masa del sistema de medida.

Rechazo en Modo Común (CMRR): El rechazo en modo común (CMRR, *Common Mode Rejection Ratio*) es la capacidad de un sistema diferencial de rechazar el voltaje en modo común de la señal. Este parámetro es función de la frecuencia y normalmente se reduce con ella. Cuanto mayor es el CMRR de un amplificador, mejor puede extraer las señales diferenciales en presencia de ruido en modo común. Muchos dispositivos de adquisición especifican el CMRR relativo a la frecuencia de red (50 o 60 Hz), que se mide en decibelios (dB) según la expresión:

$$CMRR (dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{Ganancia Diferencial}{Ganancia en Modo Común} \right)$$

3.1.5.1.1. Entradas analógicas en modo diferencial

En la medida diferencial se tiene en cuenta la diferencia de tensión entre dos líneas (entradas + y - del amplificador de instrumentación). En este caso la fuente externa y la entrada no tienen una referencia común. La medida en modo diferencial es la que mejores propiedades presenta en características como el ruido, rechazo en modo común, etc. El principal inconveniente es que se necesitan dos entradas de la tarjeta de adquisición para la medida de cada fuente de señal.

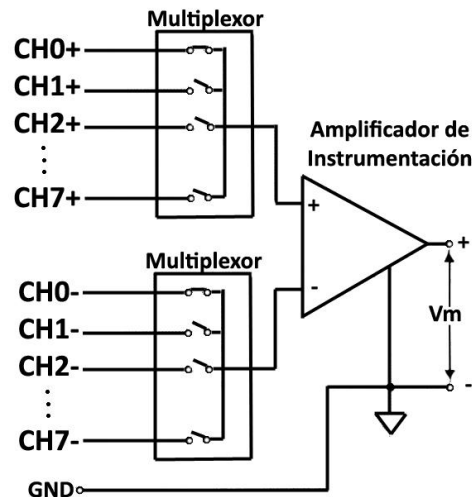


Imagen 3.6. Entrada analógica diferencial. Empleando el canal 0 de una tarjeta de 8 entradas multiplexadas

3.1.5.1.2. Entradas analógicas con referencia (RSE)

En las entradas con referencia (RSE, *Referenced Single Ended*), la señal y la electrónica de adquisición tienen un punto en común, tal y como se muestra en la siguiente figura. Al utilizar este tipo de medida se dispondrá de un mayor número de entradas, pero todas deben de tener la misma referencia. No es recomendable emplear este tipo de configuración si las tensiones a medir son pequeñas o las influencias de ruidos externos es grande (mucha distancia a la fuente de medida, cables no apantallados, presencia de fuentes de ruido externas, etc.)

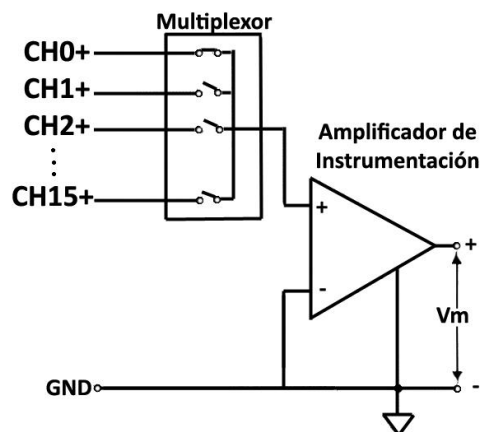


Imagen 3.7. Entrada analógica con referencia común (RSE)

3.1.5.1.3. Entradas analógicas sin referencia (NRSE)

En la configuración NRSE (*Non-referenced Single Ended*) no hay una referencia común entre la señal a medir y la electrónica de adquisición, si no que por el contrario poseen diferentes referencias. Se trata de una medida pseudo-diferencial, que presenta mejores características que la medida referenciada y aprovechando también todos los canales de la tarjeta de adquisición.

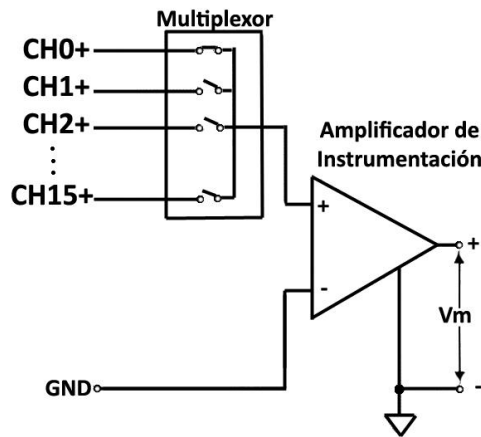


Imagen 3.8. Entrada analógica sin referencia común (NRSE)

3.1.5.2. Conversión a digital

La digitalización es uno de los procesos clave en la adquisición de señales analógicas. Como se mostró en el apartado 2.5.1, la entrada analógica (normalmente multiplexada) se ajusta al rango del convertidor ADC y se captura mediante un circuito de retención SH que la mantiene estable durante el tiempo necesario para que el conversor A/D (ADC) realice la conversión. En este proceso hay dos conceptos clave para comprender el proceso de conversión: el muestreo (que se realiza a una frecuencia denominada frecuencia de muestreo (f_m)) y la cuantificación de la señal (24), (26).

3.1.5.2.1. Frecuencia de muestreo

Muestrear una señal es obtener el valor de la misma en determinados instantes temporales. Estos valores se denominan muestras (*samples* en inglés). La frecuencia de muestreo es la velocidad a la que se obtienen dichas muestras y a la cual se deben producir las conversiones analógico-digitales en el ADC. Una frecuencia de muestreo elevada proporciona señales con mayor definición en el tiempo, pero a su vez aumenta el flujo de datos hacia el procesador, por lo que es importante encontrar el compromiso que haga óptimo el funcionamiento del sistema.

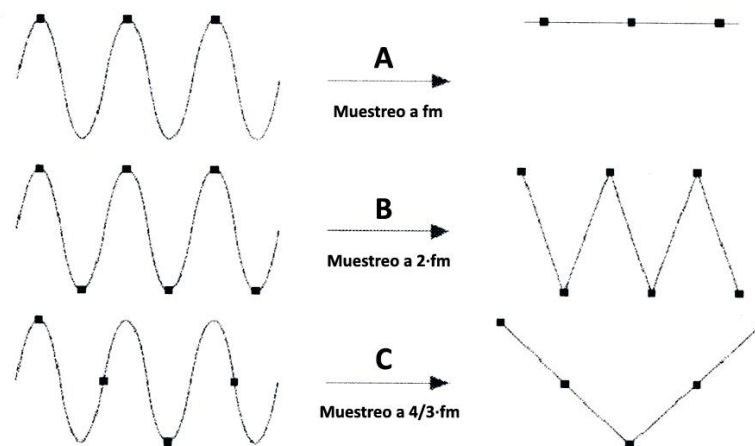


Imagen 3.9. Resultados de muestrear una misma señal a diferentes frecuencias (24)

De acuerdo con el teorema del muestreo de Nyquist-Shannon, para representar con precisión una señal, se debe muestrear a una frecuencia mayor del doble del ancho de banda que ocupa

la señal que se desea adquirir o lo que es equivalente, del doble de la frecuencia de dicha señal (26). En la imagen anterior se puede observar que en el caso C, se produce el efecto de *aliasing*, en el que la frecuencia de muestreo es inferior al doble de la de la señal y, por tanto, se recupera como señal una forma de onda con frecuencia y forma de onda erróneas.

Cuando se adquiere o genera una señal, la frecuencia de muestreo se puede fijar de dos formas: por hardware o por software. En la temporización hardware se emplea un reloj interno del dispositivo de adquisición-generación (*cRIO*), mientras que en la temporización por software, es el microprocesador del computador o el controlador el encargado de determinar cuándo se adquieren o generan las muestras. Un reloj hardware es siempre más preciso y más rápido que una temporización generada por software, ya que el microprocesador debe atender a otras tareas ajenas a la adquisición.

Gracias a la dinámica lenta de los procesos de desalación, con constantes de tiempo cercanas al minuto, y a la posibilidad de fijar de manera software el período de ejecución de comandos en el *cRIO* de forma determinista (empleo de la estructura de programación *Timed Loop* que ofrece *LabVIEW*). Se ha optado por una solución de compromiso, en donde no es necesario programar a bajo nivel (FPGA - *Field Programmable Gate Array*), permitiendo al operador la posibilidad de variar en tiempo de ejecución. Con esta filosofía se asegura que se va a producir la acción dentro del tiempo fijado, pero no en el momento exacto en el que se produce.

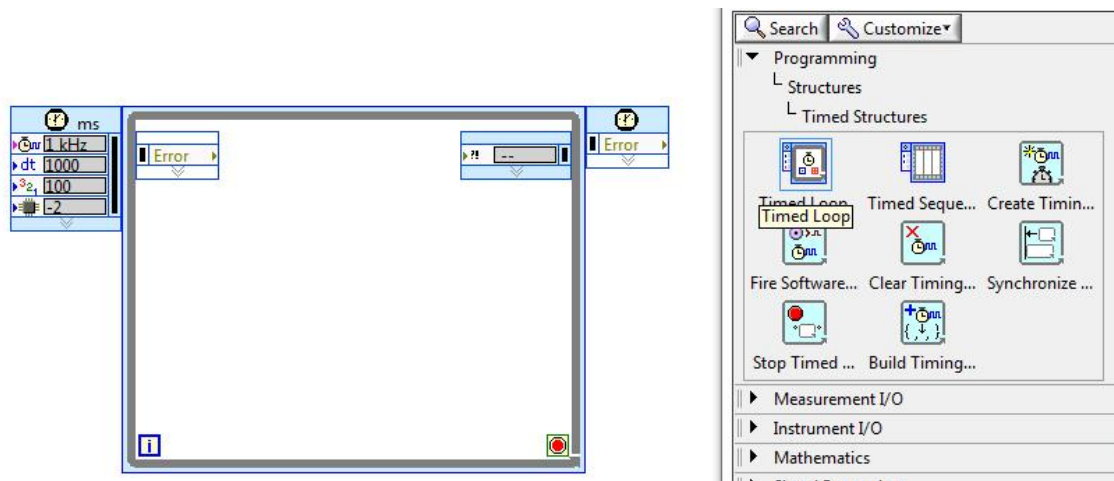


Imagen 3.10. Estructura *Timed Loop* del programa *LabVIEW*

3.1.5.2.2. Cuantificación y resolución

En la digitalización de una señal se produce un efecto de cuantificación debido a la resolución con la que trabaje el convertidor ADC. La resolución indica el número de bits que utiliza el conversor ADC para cuantificar los niveles de señal analógica. Cuanto mayor sea el número de bits del ADC, mayor será el número de niveles de señal que se pueden representar. El cálculo de la resolución viene dado por la expresión (24), (27):

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Rango de entrada}}{(2^n - 1)}$$

Donde n es el número de bits del convertidor. Así por ejemplo, el módulo de 8 entradas analógicas NI 9221 (29), empleado en la planta, posee una ADC de 12 bits y su rango máximo de funcionamiento es de ± 60 V, por tanto, la resolución esperada para este dispositivo sería de:

$$\text{Resolución} = \frac{120}{(2^{12} - 1)} = 29.3 \text{ mV}$$

Es decir, el convertidor no será capaz de discriminar diferencias de tensión inferiores a 29.3 mV, cuando se encuentre muestreando las señales de entrada de ± 10 V de la instalación. Obviamente si se empleara este dispositivo en su rango máximo de funcionamiento, la resolución sería peor.

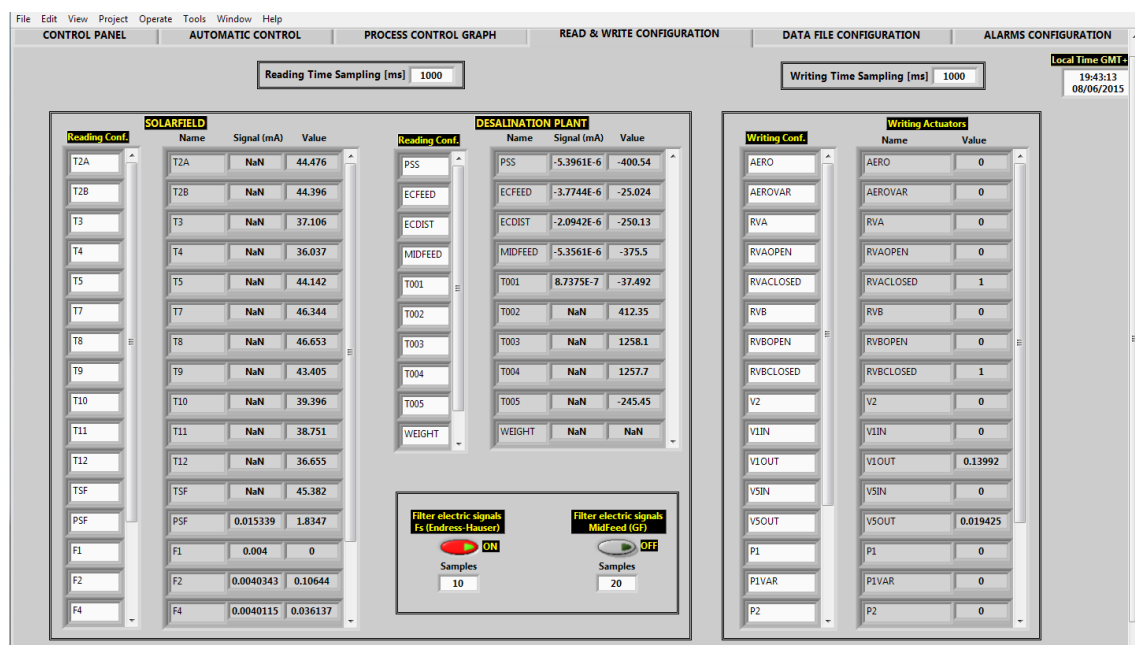


Imagen 3.11. Selección del Time Sampling desde la pantalla de configuración de lectura y escritura del SCADA

3.1.5.2.3. Niveles de entrada

Son los límites de entrada de tensión. Es muy común diferenciar entre señales unipolares y bipolares. Las señales unipolares admiten únicamente niveles de tensión positivos, mientras que las bipolares permiten las dos polaridades ($\pm V$). Para disponer del máximo de resolución en la medida, el margen dinámico de señal de entrada debe coincidir con el margen del canal de entrada del equipo de adquisición. En nuestro caso las señales que empleamos varían en el rango de los ± 10 V, pero gracias al amplificador interno que posee el módulo de adquisición se consigue ajustar al rango máximo.

3.1.5.2.4. Puertos digitales

Las líneas y puertos digitales son una parte muy importante de un sistema de entrada/salida. Una línea es una señal individual referida a un terminal físico. Los datos que maneja se denominan bits, que toman valores binarios 1 o 0. Los términos línea y bit son intercambiables. Un puerto es una colección de líneas digitales. Normalmente las líneas de un equipo de adquisición se agrupan en puertos de 8 bits.

Los puertos digitales se utilizan para el control de procesos, comunicación con equipos periféricos, etc. Los parámetros más importantes que caracterizan los puertos digitales son el número de líneas disponibles, la velocidad a la cual se pueden transferir los datos y la capacidad de control de diferentes dispositivos (protocolo para el intercambio de datos con el dispositivo). Ejemplo de ello es la adquisición de datos realizada para la balanza encargada de pesar el destilado producido, pues emplea un puerto serie RS-232. Parte de la configuración de velocidad y protocolo, se muestra en la siguiente imagen.

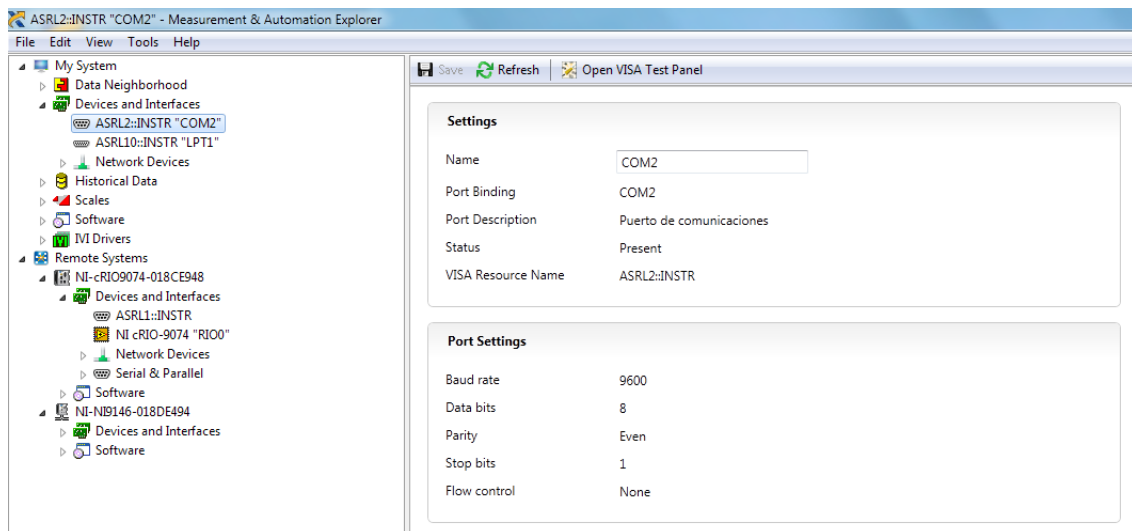


Imagen 3.12. Configuración del puerto de comunicaciones serie de la balanza de destilado

3.1.5.3. Instrumentación virtual

El concepto clásico de instrumento de medida, en ámbitos como la física, química e ingeniería, evoca un aparato autónomo que dispone de elementos de control (botones, diales, etc.) y visualización (*displays*, pantallas, etc.) que posee la electrónica para procesar la señal que se desea analizar. El principal inconveniente de este tipo de instrumentos es que resultan poco flexibles, son caros y quedan obsoletos en un plazo relativamente corto para la inversión realizada. Por todo ello, no parece descabellado pensar en sistemas abiertos que permitan diseñar instrumentos potentes y especializados a partir de herramientas intuitivas y que puedan modificarse según nuevas necesidades.

Un instrumento virtual es, por consiguiente, un módulo de software que simula los aspectos funcionales de un instrumento real haciendo uso de dispositivos hardware accesibles al ordenador, como tarjetas de adquisición de datos, de procesamiento de señal, o incluso otros instrumentos accesibles mediante buses como GPIB, RS-232, etc.

Esta filosofía es la seguida por *LabVIEW*, el software que *NI* facilita para la programación y desarrollo de sus aplicaciones, las cuales son denominadas directamente VI (*Virtual Instrument*) (30).

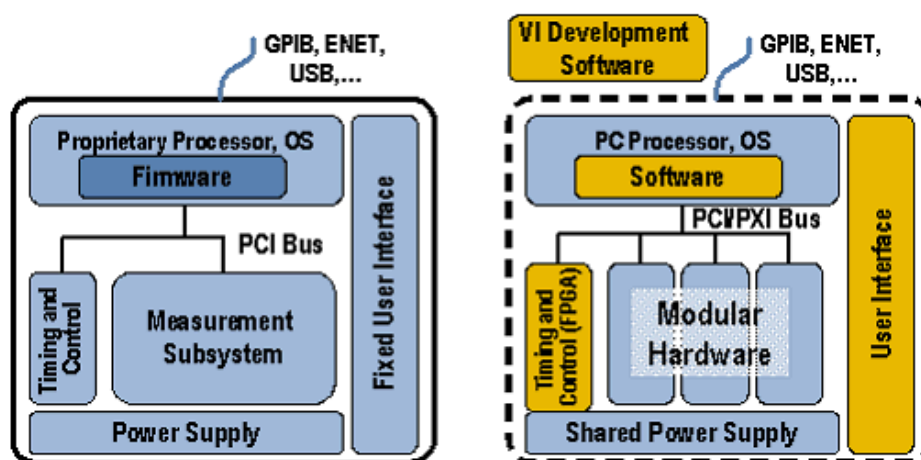


Imagen 3.13. Instrumentos tradicionales (izquierda) e instrumentos virtuales basados en software (derecha) (30)

Cada instrumento virtual consta de dos partes— software y hardware (Imagen 3.13). Un instrumento virtual tiene un precio accesible y muchas veces mucho menor que los instrumentos tradicionales similares para las tareas de medición actual. Sin embargo, el ahorro a lo largo del tiempo, por ejemplo para cambiar el tipo de aplicación o el tipo de medida, sólo sería necesario cambiar la parte software, siendo posible reutilizar la estructura hardware ya presente.

3.2. Descripción de la planta

En este apartado se abordará en su primer punto la descripción conceptual y funcional de los principales procesos que se llevan a cabo en las instalaciones. Posteriormente, se enumerarán los distintos elementos que componen todo el sistema.

Respectivamente, en el segundo y tercer punto se entrará en detalle con todos los tipos de sensores y actuadores presentes, para terminar con un cuarto punto donde se expondrá la arquitectura hardware y software encargada de gobernar toda la planta.

3.2.1. Diagrama conceptual del funcionamiento de la planta

Desde que surge una idea, fruto de la necesidad, hasta su materialización existen innumerables factores que la alteran, perfeccionan y en definitiva, la definen hasta hacerla realidad. En la Imagen 3.14 se muestra una configuración inicial de todos los componentes que conformaban la planta.

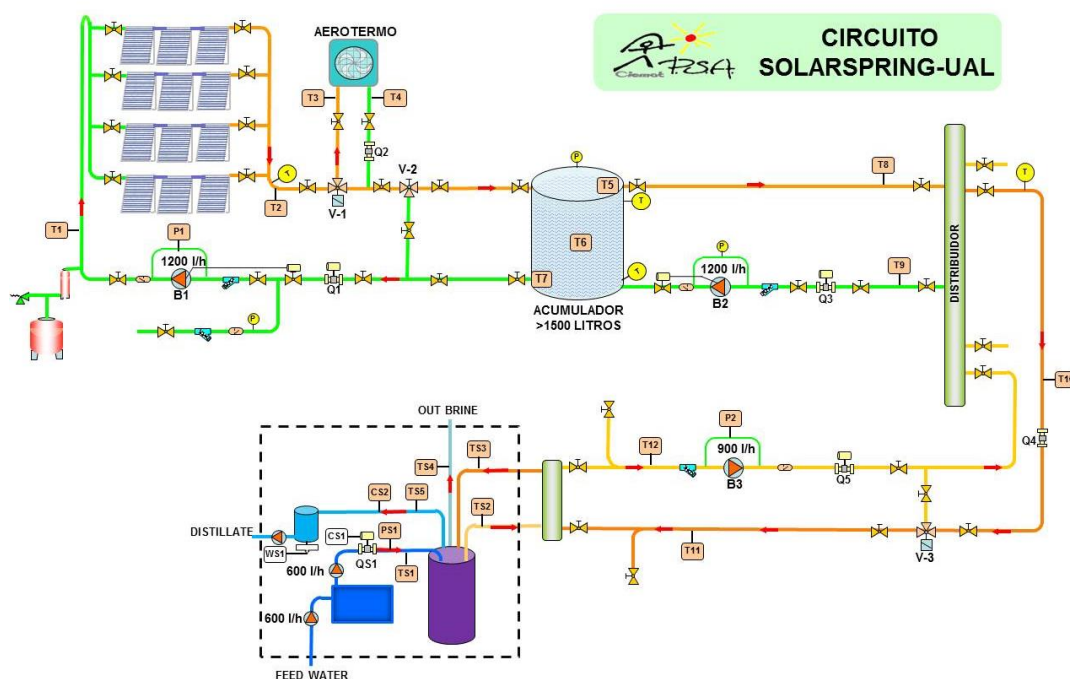


Imagen 3.14. Diseño inicial del circuito de la desaladora SolarSpring y el campo solar

A día de hoy, aunque la esencia fundamental del concepto permanece intacta, muchos actuadores y sensores han sido modificados (cambios de posición, adición de nuevos tipos de sensores, actuadores con diferentes funcionalidades, etc.).

Este continuo cambio atiende fundamentalmente a los esfuerzos en la mejora tanto del proceso como en el control del mismo y se realiza de forma tan dinámica gracias al carácter experimental de la planta. En una planta industrial, con objetivos de producción fijados,

detenerla para efectuar mejoras puntuales, sólo es posible cuando esta mejora justifique un incremento de la producción que avale las pérdidas producidas por la inactividad.

Probablemente cuando esté leyendo estas líneas, alguna parte de las instalaciones haya cambiado, por suerte, esto no afecta a la descripción de procesos de la planta que se desarrollarán a lo largo de este apartado. En la Imagen 3.15 se muestra el sinóptico general simplificado de todas las instalaciones. En él se han eliminado las sondas de temperatura, presión y todas las válvulas manuales, dejando sólo los actuadores y elementos principales para, de este modo, clarificar el gráfico y hacer más descriptivo el proceso.

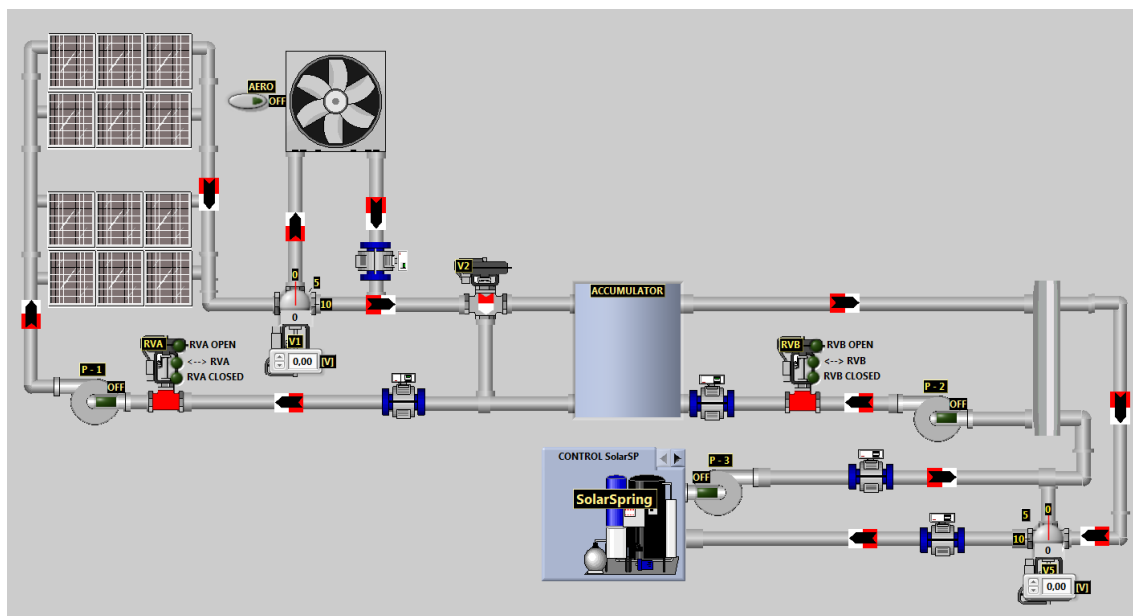


Imagen 3.15. Esquema general de procesos de la planta desaladora

3.2.1.1. Descripción de procesos

En una primera aproximación al funcionamiento se puede realizar una división, atendiendo a la finalidad de las partes, entre campo solar y desaladora.

3.2.1.1.1. Campo solar

Cuando se habla de Campo Solar en este epígrafe no sólo se refiere a los captadores planos, si no que se engloba también a todo el grupo hidráulico (tanques, bombas, etc.) que hace funcional al conjunto. Por la extensión ocupada en metros cuadrados, cercana al 90% de la superficie destinada a las instalaciones, se trata del proceso de mayor envergadura y que plantea mayores problemas desde el punto de vista del control de procesos.

La principal función del conjunto que forma el Campo Solar es elevar la temperatura del agua de proceso hasta un punto de trabajo determinado. Fijando un caudal y a dicha temperatura se hará circular a través de la membrana de destilación que actuará como un intercambiador de calor. Fruto de este gradiente térmico, se consigue llevar a cabo el proceso de desalación.

Por las características físicas de las membranas de desalación ensayadas, la temperatura final del proceso se encuentra relativamente cerca de la temperatura máxima que es capaz de soportar el dispositivo sin deteriorarse o romperse. Por otro lado, no existe la posibilidad de regular la cantidad de radiación recibida por los captadores solares. Es por ello que se integran dos elementos en el circuito hidráulico capaces de regular excesos o defectos en la misma y hacer viable el proceso de control de la temperatura de desalación: El Aerotermo y el Acumulador.



Imagen 3.16. Conjunto de captadores solares planos completo



Imagen 3.17. Circuito hidráulico del Campo Solar: Grupo Circo Mega 2725-N

El Aerotermo es básicamente el dispositivo que, mediante ventilación forzada, se encarga de disipar el exceso de calor al exterior del sistema. Este sobrecalentamiento puede ser fruto de una elevada radiación y/o debido a baja demanda de agua caliente del proceso. Como veremos en el apartado 3.1.3 de modos de funcionamiento se puede regular el caudal que hacemos circular por el Aerotermo, así como su propio régimen de trabajo.

El Acumulador, a diferencia del Aerotermo, no puede seleccionarse el emplearlo o no. Siempre se debe trabajar en estas instalaciones hacia él o desde él. Este depósito de 1500 litros es el encargado, como su nombre bien describe, de acumular calor procedente de los captadores planos. Es desde este tanque del cual parte el agua de proceso caliente, la cual se emplea en las membranas para la desalación. Gracias a su gran volumen se comporta como un almacén térmico, estabilizando la temperatura, aislándola de las perturbaciones a las cuales se ve sometido el Campo Solar (nubes, rachas de viento, lluvia, etc.).

El agua de proceso, a la que se hacía mención y de la que está rellena por completo tanto los captadores como el grupo hidráulico, en realidad es una mezcla de agua destilada con glicol

propileno denominada *DC20* producida por *Wagner & Co.* (31) Las principales propiedades de dicha mezcla son:

- Una elevada eficiencia en la transferencia de calor.
- Asegura la protección frente a la corrosión.
- Compatible con el uso de plásticos.
- No contiene elementos nocivos para las personas o el medioambiente.
- Protección frente a congelación de las tuberías. Por ejemplo, para la concentración empleada en las instalaciones del 30% en volumen de compuesto, el punto de congelación se sitúa en -12°C .

Substance Properties	DC20 in Volume %					
	30	40	50	60	70	100
Thermal conductivity (W/mK)	-10 °C	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	+20 °C	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3
	+100 °C	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3
Specific heat capacity (kJ/kgK)	-10 °C	3.8	3.7	3.5	3.3	3.1
	+20 °C	3.9	3.7	3.6	3.4	3.2
	+100 °C	4.1	4.0	3.9	3.7	3.6
Kinematic viscosity (mm ² /s)	-10 °C	13	22	34	55	90
	+20 °C	3.1	4.3	6.2	9.0	13.1
	+100 °C	0.6	0.7	0.9	1.0	1.3
Boiling point at 1.013 bar (°C)		102	103	104	106	108
Density at +20 °C (g/cm ³)		1028	1036	1043	1048	1052
Freezing point (°C)		-12	-19	-29	-44	-51

Tabla 3.3. Propiedades físicas del compuesto DC20 (31)

3.2.1.1.2. Desaladora

El proceso de desalación llevado a cabo en la planta *SolarSpring* (32) es el objeto de la mayor parte de las investigaciones que tienen lugar en estas instalaciones. El proceso se conoce como Destilación por Membranas (MD, *Membrane Distillation*).

La Destilación por Membranas es un proceso térmico, en el cual, se hace circular el vapor de agua gracias a la diferencia de temperatura, a través de una membrana hidrófoba (la cual repele el agua en estado líquido), condensándose dicho vapor en el otro lado de la membrana. Dicha membrana es el corazón de este sistema y se describirá con más detalle en el punto 3.2.1.2.5 de este apartado.

Una descripción esquemática correspondería con la ilustrada en la Imagen 3.18. El agua de mar llega al tanque de alimentación y desde ahí es bombeada de nuevo hacia el módulo de Destilación por Membranas (Módulo MD). En contra corriente se encuentra circulando el agua de proceso caliente proveniente del Campo Solar, actuando el módulo MD como un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Llegados a este punto parte del agua marina se evapora y dicho vapor atraviesa la membrana hidrófoba. De esta forma se consigue separar la salmuera del destilado, el cual condensará en la otra pared de la membrana, siendo recogido por el canal de destilado.

A este modo de funcionamiento directo, en el cual el agua de mar es separada en destilado y salmuera, habría que añadir otro modo que no es más que una modificación del mismo. Consiste en reabastecer (*Refill Mode*) el proceso con la salmuera de destilaciones anteriores. Este modo de trabajo está siendo objeto de nuevas investigaciones y ensayos.

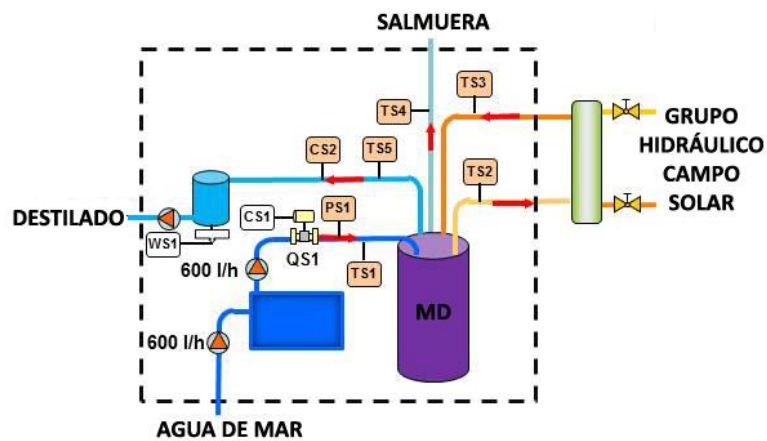


Imagen 3.18. Esquema del proceso de desalación por membrana

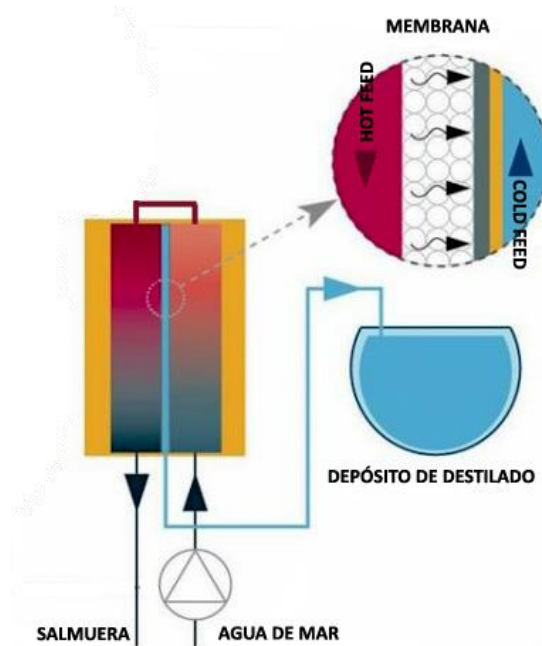


Imagen 3.19. Esquema detalle del módulo de destilación por membrana



Imagen 3.20. Desaladora SolarSpring instalada y conectada al grupo hidráulico del Campo Solar

3.2.1.2.Elementos

En los siguientes epígrafes se describirán los elementos propios de esta instalación, los cuales han sido mencionados anteriormente en la descripción de los procesos. Se tratará de profundizar en su funcionamiento y propiedades técnicas.

3.2.1.2.1. Captadores solares planos

Los captadores solares planos son los encargados de, gracias a la radiación solar recibida, calentar el agua de proceso. Esto lo logran gracias al efecto invernadero que ocurre en el interior de las mismas, puesto que la lámina de vidrio que las recubre permite la entrada de la radiación, pero evita a su vez la fuga al exterior. El serpentín de tubería atrapada en el interior de los mismos, por donde circula el agua de proceso, absorbe esta radiación calentándola a su paso.

El modelo empleado es el Captador solar EURO L20 MQ AR de la marca *Wagner & Co.* Este captador posee 4 conexiones para facilitar el montaje de largas baterías de captadores. Es posible la conexión en paralelo de hasta 10 captadores. De esta manera es relativamente fácil realizar instalaciones de hasta 50 m² mediante combinaciones de conexiones en serie y paralelo. Cuyas especificaciones técnicas son:

- Cubierta de vidrio antireflexivo *sunarc*® del 96 % de transmisividad.
- Absorbedor de meandro soldado por láser con recubrimiento selectivo en vacío.
- Aislamiento térmico de 60 mm en la parte posterior.
- Marco de aluminio anodizado.
- Pared trasera de aluminio macizo.
- Lana mineral del grupo 040 resistente a altas temperatura y con pocos aglutinantes (33).

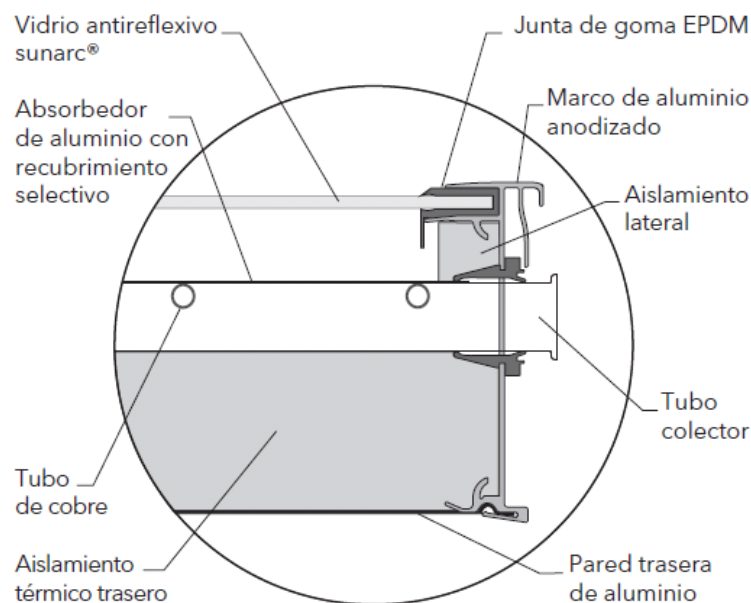


Imagen 3.21. Estructura del captador solar (33)

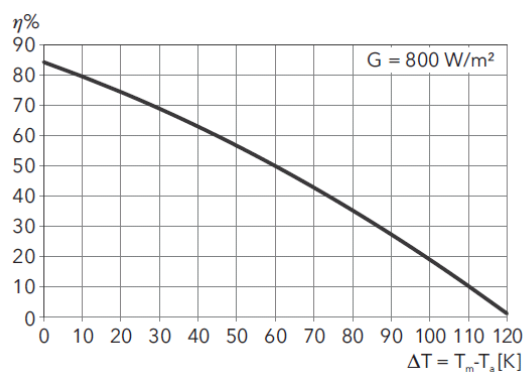


Imagen 3.22. Curva de rendimiento (33)

Característica	EURO L20 MQ AR
Área bruta / área de apertura (según EN 12975)	2,61 m ² / 2,37 m ²
Formato (Largo x Alto x Ancho)	2151 mm x 1215 mm x 110 mm
Rendimiento de captador (según EN12975)	$\eta_o = 84,2\%$; $a_1 = 3,62 \text{ W/m}^2\text{K}$; $a_2 = 0,016 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
Factor de corrección angular (50°)	$k_{\theta} (50^\circ) = 94\%$, $k_{\text{diff}} = 87\%$
Carcasa de captador	Marco de aluminio anodizado, pared trasera de aluminio, aislamiento térmico de 60 mm en la parte trasera, tiras de aislamiento continuas en los bordes
Capacidad térmica específica	6,8 kJ/m ² K
Cubierta de vidrio	Vidrio solar de seguridad de 4mm de espesor, con recubrimiento antirreflexivo sunarc® y transmisividad $\tau = 96\%$
Absorbedor	Absorbedor de meandro de chapa de aluminio y tubo de cobre soldado por láser
Recubrimiento del absorbedor	Recubrimiento en vacío altamente selectivo, $\alpha = 95\%$, $\epsilon = 5\%$
Volumen del absorbedor	2,3 litros
Medio caloportador	DC20 (propilenglicol con inhibidores), ¡concentración según necesidad!
Presión máxima de servicio admisible	máx. 10 bar
Temperatura de estancamiento (según EN12975)	207 °C
Conexión de la sonda de temperatura	Vaina de inmersión de 41 mm de largo
Conexión del captador	Abrazadera de sujeción con junta tórica y Boquilla de conexión de 22 mm
Certificado	SolarKeymark; distintivo CE
Cargas de presión / succión permitidas	3,2 kN/m ²
Tipo de montaje	Sobre el tejado y en cubierta plana en formato horizontal (inclinación 10 - 85°)
Peso	50 kg

Tabla 3.4. Características del captador solar EURO L20 MQ AR (33)

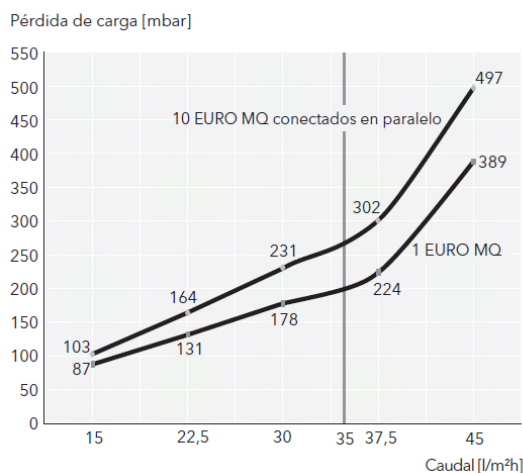


Imagen 3.23. Pérdidas de carga para un captador y para 10 captadores conectados (33)



Imagen 3.24. Grupo de 3 captadores en serie y 4 grupos de captadores serie conectados en paralelo

3.2.1.2.2. Depósito Acumulador

El modelo PSX/PSX-F del fabricante *Huch GmbH Behälterbau* es un depósito de inercia con Acumulador para el apoyo al proceso de calefacción del agua de proceso. Posee un aislamiento desmontable libre de hidrocarburos clorofluorados y PVC con regleta de cierre y revestimiento robusto de poliesterol. Pérdidas térmicas mínimas mediante el aislamiento de espuma blanda. El modelo empleado en las instalaciones corresponde con el tamaño de 1500 litros. Sus características principales son la temperatura y presión máxima que es capaz de soportar, las cuales quedan fijadas en 95°C y 3 bares respectivamente (34).

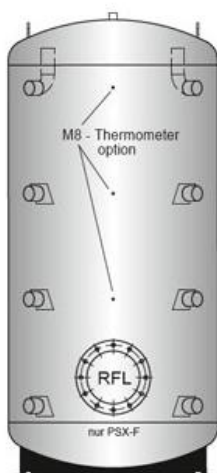


Imagen 3.25. Esquema del Acumulador PSX/PSX-F (34)

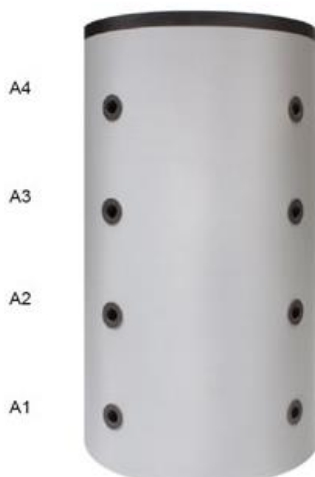


Imagen 3.26. Detalle de la posición de los sensores y del aislamiento térmico del tanque acumulador

3.2.1.2.3. Distribuidor

El distribuidor hidráulico consiste básicamente en una sección de tubería que aglutina todas las entradas y salidas de los circuitos hidráulicos que se conectan (o conectarán) a las instalaciones del campo solar. Se emplaza a la salida del Acumulador.



Imagen 3.27. Detalle del distribuidor del grupo hidráulico

3.2.1.2.4. Aerotermo

Con una radiación intensa y un bajo consumo de agua caliente, en las instalaciones solares térmicas, se presenta un grave problema como es el sobrecalentamiento. En estos casos, la cesión de calor de los paneles al sistema debe interrumpirse. Dicho sobrecalentamiento se puede presentar, tanto en los depósitos acumuladores como en el campo solar. La solución ideal es integrar en el circuito hidráulico de la instalación un Aerotermo, llamado también disipador de calor.

Cuando los sensores de temperatura detectan la superación del límite de seguridad, parte del fluido se desvía hacia el circuito de tuberías que integra el sistema con el Aerotermo, que lo enfría mediante ventilación forzada, expulsando el calor excedente al exterior (35). El modelo instalado en la planta corresponde al Aerotermo AAS4V cuyas características principales son:

Características del modelo AAS4V	
Potencia disipada $\Delta T = 70^{\circ}\text{C}$	32 Kw
Potencia absorbida ventiladores	100 W
Caudal de aire de los ventiladores	3000 m ³ /h
Caudal fluido caloportador	2400 l/h
Presión sonora	42,12 dB
Conexión de entrada	Cu35mm
Conexión de salida	Cu35mm
Anchura	870 mm
Altura	613 mm
Profundidad	138 mm

Tabla 3.5. Características principales del modelo de Aerotermo AAS4V (35)

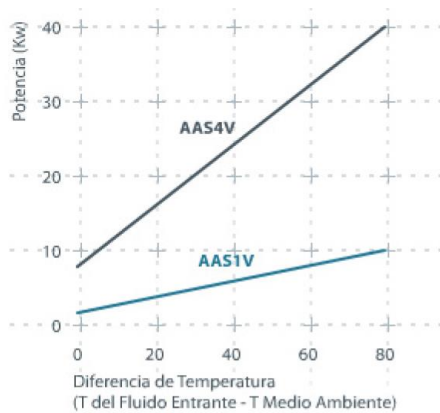


Imagen 3.28. Potencia disipada para los modelos AAS1V y AAS4V (35)

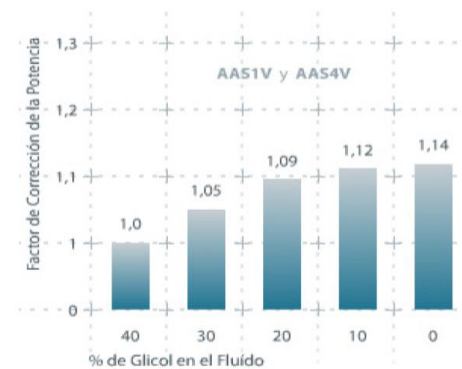


Imagen 3.29. Potencia en función del porcentaje de glicol en el fluido caloportador (35)

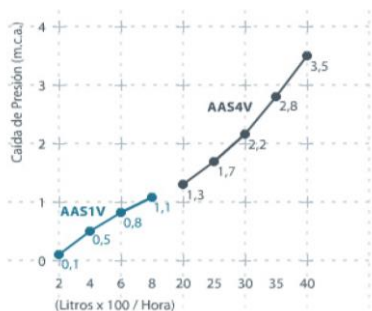


Imagen 3.30. Pérdida de carga en relación al caudal (35)



Imagen 3.31. Instalación exterior del Aerotermo de la Serie "AAS4V"

3.2.1.2.5. Membrana de destilación

La destilación por membrana es una técnica de separación que aúna el proceso de destilación térmico con el de filtrado por membrana. La energía térmica invertida en el proceso se emplea para realizar el cambio de estado del agua líquida a vapor.

Al contrario de las membranas de ósmosis inversa (RO – *Reverse Osmosis*), en las cuales el diámetro de los poros varía desde 0.1 a 3.5 nm, las membranas para MD poseen un diámetro entre 0.1 a 0.4 μm .

El efecto de separación de estas membranas poliméricas se basa en su naturaleza hidrófoba. Lo cual significa que, hasta cierto límite de presión, la tensión superficial evita que el agua líquida atraviese los poros, pero en cambio, las moléculas de agua en estado gaseoso pueden atravesar la membrana (32).

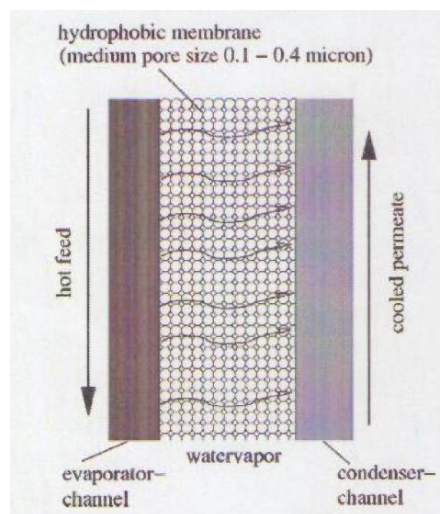


Imagen 3.32. Principio de funcionamiento de la destilación por membrana

La construcción de estas membranas, ya sea sus materiales, como su disposición geométrica, es uno de los principales campos de desarrollo e investigación.



Imagen 3.33. Detalle de la membrana cilíndrica de la desaladora SolarSpring

3.2.1.2.6. Depósito de destilado

Como su nombre indica es el depósito encargado de recoger el producto de la destilación, el agua de mar desalada. Representa el final del proceso obteniéndose valores de conductividad del orden de los $\mu\text{siemens}$. Como detalle adicional, se colocó sobre una balanza para poder realizar el balance de masas del proceso como se puede observar en la siguiente imagen.



Imagen 3.34. Detalle del depósito de destilado instalado sobre la balanza

3.2.1.3. Modos de operación

La instalación del campo solar posee tres lazos o bucles hidráulicos bien diferenciados. El primer lazo cumpliría las funciones de entrada del sistema, tratando de regular el exceso o defecto de temperatura en el agua de proceso y almacenándola en el Acumulador. El segundo cumpliría una función básica de transporte y distribución. Por último el tercer lazo sería el encargado de fijar un caudal y temperatura constante a la entrada del módulo MD de la desaladora.

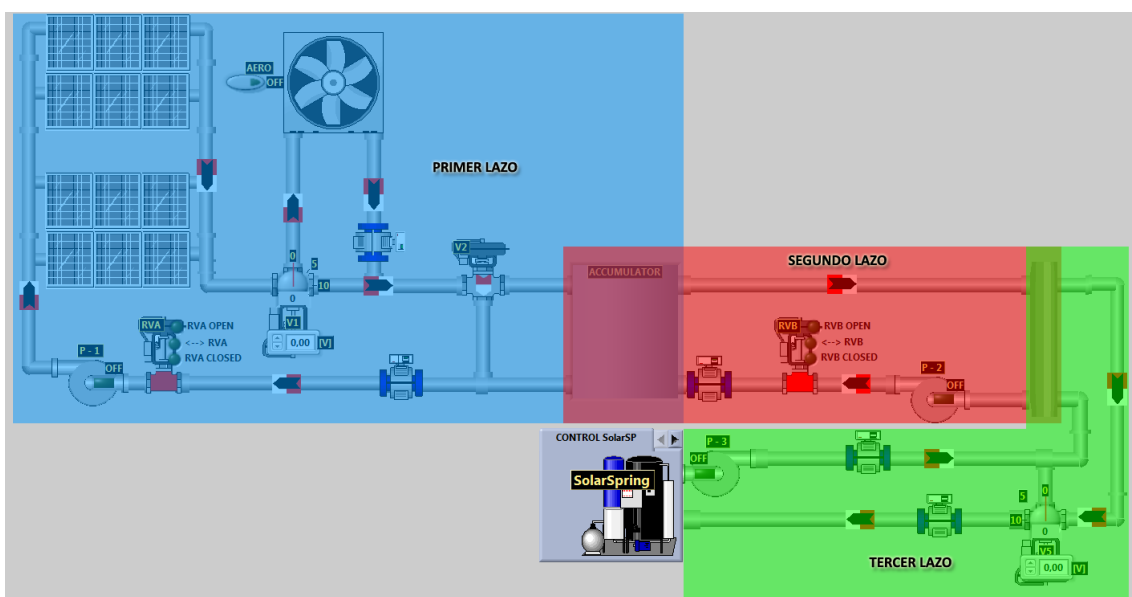


Imagen 3.35. Diagrama de los lazos hidráulicos del campo solar

- PRIMER LAZO: Cuando la temperatura en el acumulador es superior a la de los paneles captadores, se fuerza la recirculación del fluido caloportador a través de los mismos para elevar su temperatura. Governa la maniobra la válvula V2 como se aprecia en el siguiente diagrama.

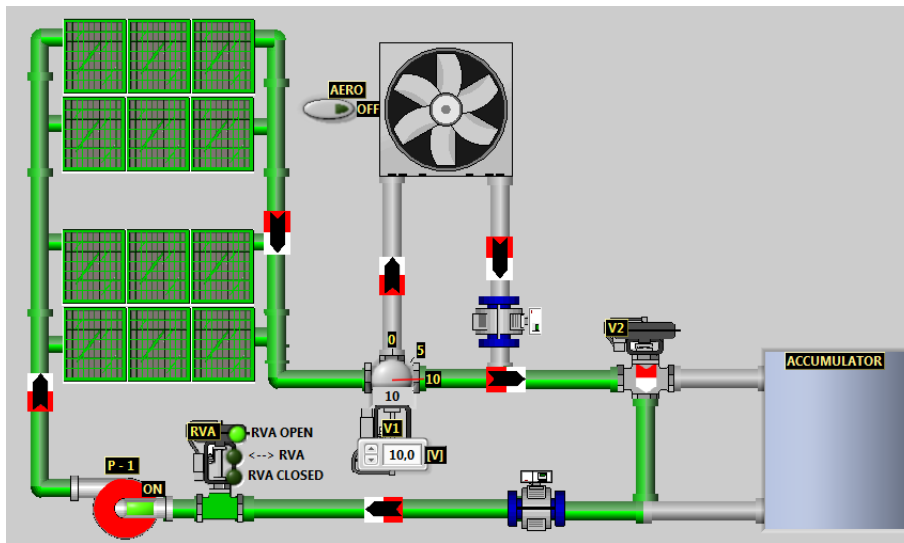


Imagen 3.36. Primer lazo: Configurado para la recirculación en los captadores solares

- Cuando la temperatura en los captadores es superior a la del tanque Acumulador, V2 se encarga de direccionar el caudal proveniente de los captadores a través del mismo. Este nuevo lazo hidráulico elevará la temperatura del tanque Acumulador de inercia térmica.

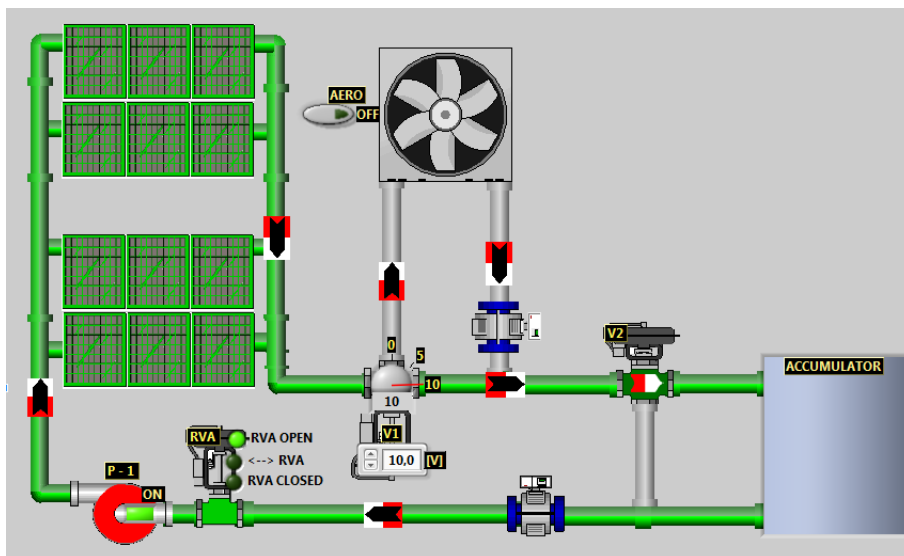


Imagen 3.37. Primer Lazo: Aumento de la temperatura en el tanque acumulador

- Puede excederse el límite de temperatura del Acumulador (recordamos que era de 95°C), dado que no podemos ocultar los captadores de la radiación solar, se selecciona el circuito del Aerotermo para disipar el exceso de calor del sistema. Esta maniobra se lleva a cabo empleando la válvula proporcional V1.

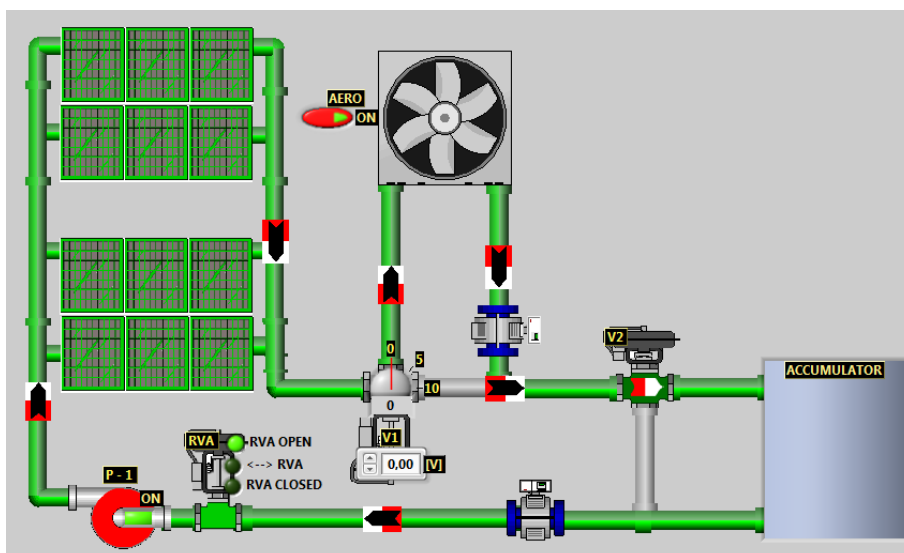


Imagen 3.38. Primer Lazo: Disipación de calor del sistema empleando el circuito del Aerotermo

- Nótese que gracias al carácter proporcional de V1 es posible seleccionar el porcentaje de caudal, proveniente de los captadores, que se desea enfriar en el circuito del Aerotermo. Esto añade una herramienta más precisa a la hora de controlar esta sección de la planta.

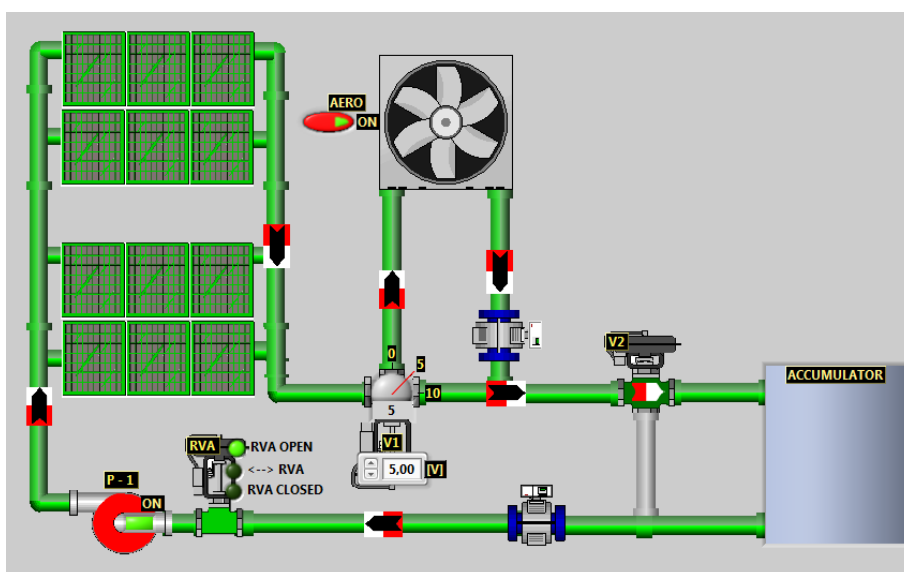


Imagen 3.39. Primer Lazo: Disipación de calor del sistema empleando el circuito del Aerotermo (V1 al 50%)

- SEGUNDO LAZO: Este lazo es el encargado de transportar y abastecer el distribuidor de la planta con agua de proceso procedente del depósito Acumulador. La principal variable de control es la proporcionada por la selección de la velocidad de la bomba P-2. Gracias al enorme volumen del tanque Acumulador, este debe comportarse, en teoría, como un intercambiador de calor con el flujo en sentido inverso al primer lazo.
- TERCER LAZO: Como ya se ha indicado con anterioridad, la funcionalidad principal de este lazo es la de estabilizar. Conseguir una temperatura y un caudal estable en la membrana de destilación de la desaladora es algo crucial. Para tal propósito, se dispone de P-3 que será la responsable de fijar un caudal constante y la válvula proporcional V5 dará un leve control de ajuste final sobre la temperatura que llegue a la desaladora. Sirva de ilustración que los ensayos de destilación se realizan a temperaturas que rondan los 80°C y por encima de los 85°C la membrana puede destruirse.

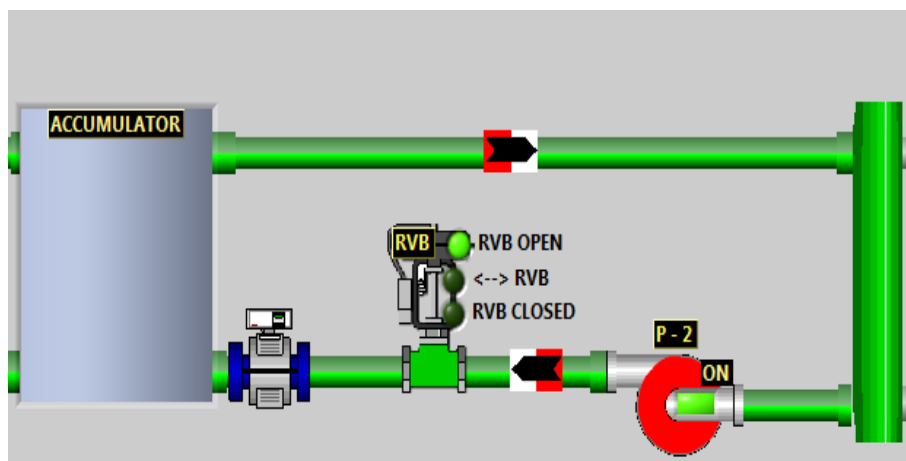


Imagen 3.40. Segundo Lazo: Distribución del caudal desde el tanque Acumulador

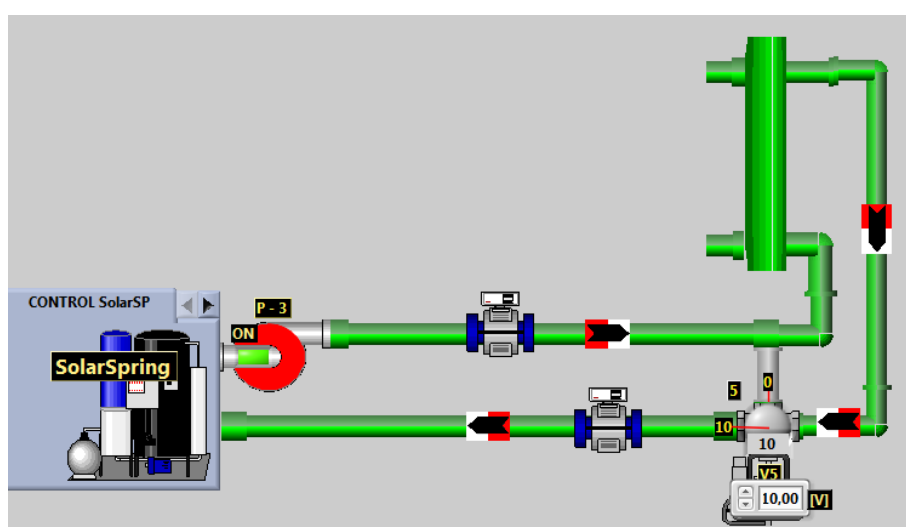


Imagen 3.41. Tercer Lazo: Temperatura y caudal fijo hacia la desaladora

3.2.2. Descripción del sistema de medida

A lo largo de este epígrafe se describirán todos los sensores que conforman el sistema de medida y a la postre serán el corazón de la adquisición de datos de los procesos.

3.2.2.1. *Sondas de temperaturas*

El modelo de termómetro instalado es el Omnigrad M TST90 del fabricante *Endress+Hauser* (36). Se trata de un detector de temperatura resistivo (RTD) que emplea una Pt100, cuya resistencia a 0°C es de 100 Ω y con un coeficiente de temperatura $\alpha = 0.003851 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Dicha resistencia se emplaza en una fina capa (1 μm) de platino ultra puro, vaporizada al vacío y litografiada sobre un sustrato cerámico. Finalmente se protege con una capa de protección frente a la oxidación. El rango de funcionamiento de esta sonda está comprendido entre -200°C a 600°C. La conexión de medida empleada es un típico puente Wheatstone (28). Gracias a este tipo de conexión se puede medir con gran precisión la variación de resistencia de nuestra sonda y, gracias a su comportamiento lineal, deducir la temperatura asociada.

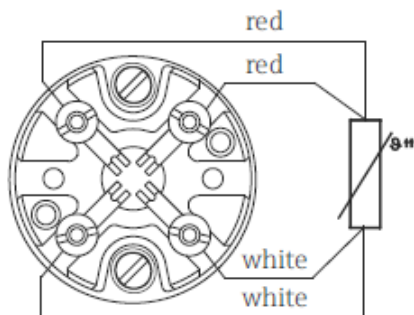


Imagen 3.42. Conexión de la sonda a 4 hilos (Puente Wheatstone) (36)

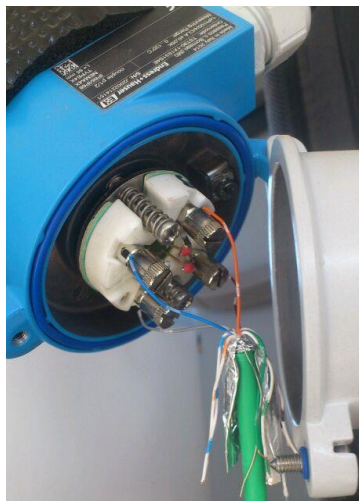
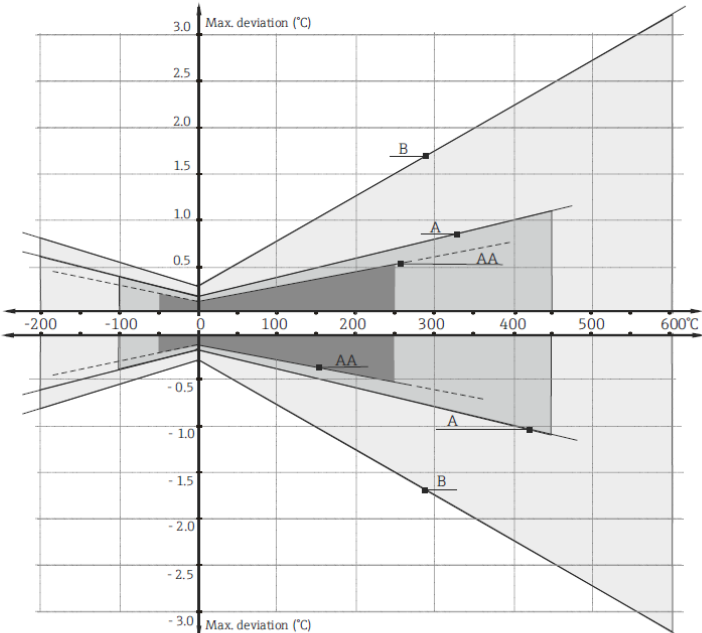
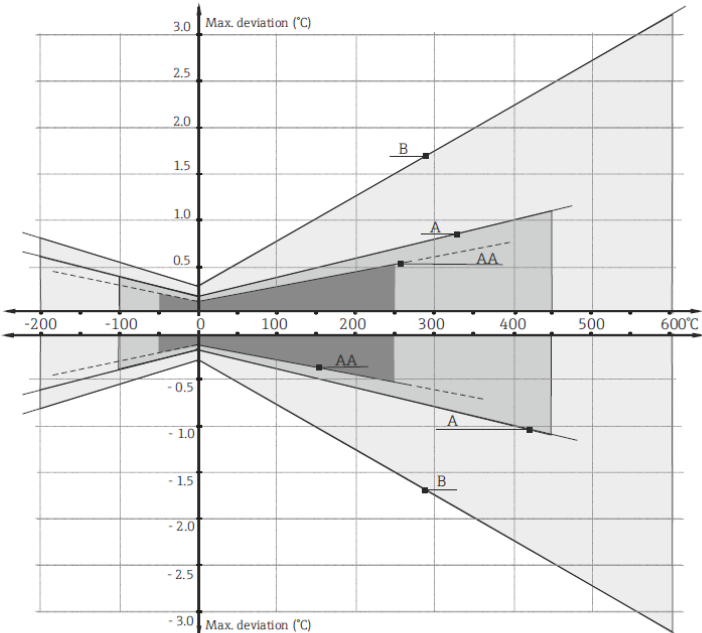


Imagen 3.43. Pruebas de conexión de cuatro hilos de una sonda de temperatura de la planta

Class	Max. tolerances (°C)	Temperature range	Characteristics
RTD max. error type TF - range: -50 to +500 °C			
Cl. AA, former 1/3 Cl. B	$\pm (0.1 + 0.0017 \cdot t ^{1})$	0 to +150 °C	
Cl. A	$\pm (0.15 + 0.002 \cdot t ^{1})$	-30 to +300 °C	
Cl. B	$\pm (0.3 + 0.005 \cdot t ^{1})$	-50 to +500 °C	
RTD maximum error type WW - range: -196 to +600 °C			
Cl. AA, former 1/3 Cl. B	$\pm (0.1 + 0.0017 \cdot t ^{1})$	-50 to +250 °C	
Cl. A	$\pm (0.15 + 0.002 \cdot t ^{1})$	-100 to +450 °C	
Cl. B	$\pm (0.3 + 0.005 \cdot t ^{1})$	-196 to +600 °C	

1) $|t|$ = absolute value °C

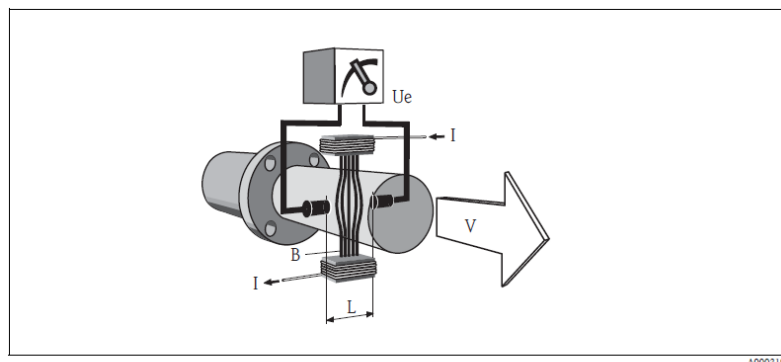
Tabla 3.6. Precisión de la sonda Omnicard TST90 con la temperatura (36)



Imagen 3.44. Detalle de la instalación en ángulo de la sonda de temperatura T3

3.2.2.2. Caudalímetros

Los caudalímetros empleados son el modelo Proline Promag 50H de la marca *Endress+Hauser* (37). Estos caudalímetros son del tipo electromagnético y basan sus medidas en la Ley de Inducción electromagnética de Faraday. Dicha ley establece, a groso modo, que una tensión será inducida en un conductor en movimiento que se encuentre sumergido en un campo magnético. En esta medida electromagnética, el fluido se identifica con el conductor móvil. El voltaje inducido es proporcional a la velocidad del fluido (v) y es detectada por dos electrodos de medida que transmiten su señal a un amplificador. Obtener el caudal (Q) a partir de la velocidad es trivial gracias a que se conoce el valor del diámetro de la tubería (el área A).



$$U_e = B \cdot L \cdot v$$

$$Q = A \cdot v$$

U_e = induced voltage
 B = magnetic induction (magnetic field)
 L = electrode gap
 v = flow velocity
 Q = volume flow
 A = pipe cross-section
 I = current strength

Imagen 3.45. Diagrama de funcionamiento del caudalímetro electromagnético (38)

A diferencia de las sondas de temperatura, que no necesitaban de una fuente de alimentación para realizar la medida, si no que bastaba con la proporcionada por el propio módulo de medida, los caudalímetros de la serie Promag necesitan alimentación de red (230V AC) principalmente para poder generar el campo magnético.

Para realizar la comunicación con el módulo de medida emplea el protocolo HART, el cual consiste en traducir su escala de medida en corriente de 4 a 20 mA. Estos caudalímetros son capaces de medir flujos de hasta 50 l/min. Como posteriormente veremos, dado que en la

instalación difícilmente se supera la mitad de esa escala, este sobredimensionamiento nos provocará ciertos problemas en las medidas de caudal. Uno de los motivos principales, es que sólo se emplea una fracción del rango de medida.



Imagen 3.46. Detalle del cableado del caudalímetro F1

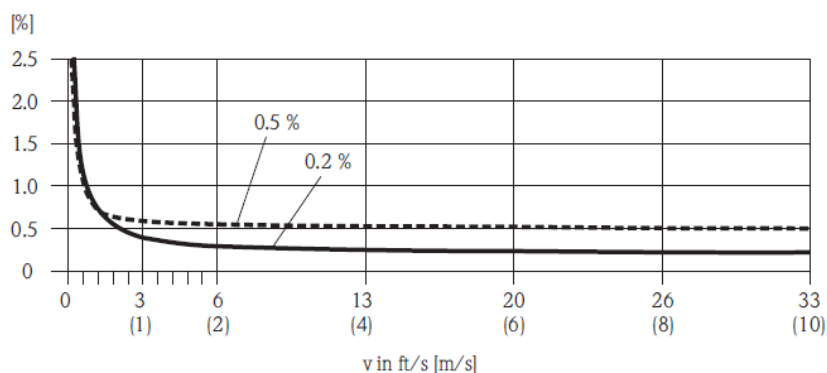


Imagen 3.47. Diagrama relación entre el error en la medida y el caudal (37)



Imagen 3.48. Detalle de la instalación del caudalímetro F2 (A.K.A. Q2)

3.2.2.3. Sensores de presión

El modelo seleccionado es el Cerebar T PMP131, nuevamente manufacturado por *Endress+Hauser* (38). Este transductor de presión absoluta posee un sensor piezoresistivo del compuesto cerámico Ceraphire®. Ofrece una gran protección contra la corrosión o abrasión e incluso contra sobrepresiones. Este tipo de sensor emplea una fuente de alimentación de tensión nominal en el rango de los 12 a 30 V y ofrece una medida en corriente de 4 a 20 mA.

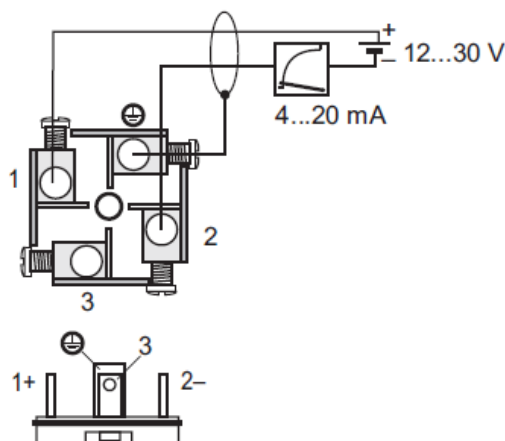


Imagen 3.49. Diagrama de cableado de una sonda de presión Cerebar T PMP131 (38)

El rango de medida de este sensor es hasta los 400 bares, pero sin embargo, la temperatura de funcionamiento es de -25° a 70°C . Su límite máximo es ampliamente rebasado en los puntos donde precisamente se necesita conocer la presión, como son el campo de captadores o el tanque Acumulador (se recuerda que este sólo soportaba 3 bar, por tanto es crítico). La solución viene de mano de una modificación ingeniosa a la par que efectiva: la inclusión de un serpentín de cobre desde el punto caliente donde se desea medir la presión hasta el propio sensor. De este modo se permite el enfriamiento hasta un rango de temperatura que resulte seguro para la sonda.

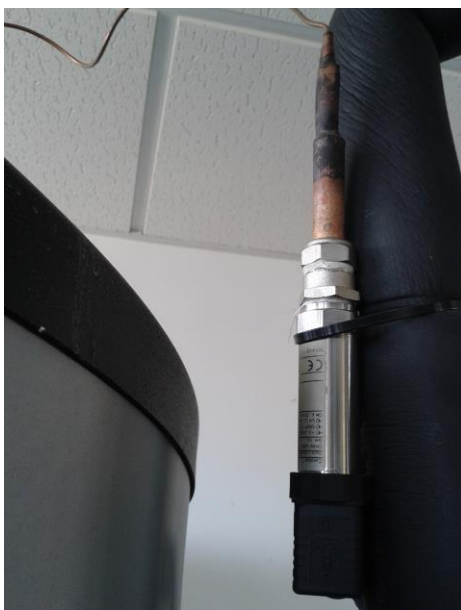


Imagen 3.50. Detalle de instalación del sensor de presión con serpentín de cobre

3.2.2.4. Conductímetros

Para conseguir realizar con precisión una medida de conductividad, es necesario conocer la temperatura a la cual se realiza dicha medida, pues la variación de esta propiedad física se ve afectada en gran medida por la temperatura del medio. Por esta razón el conductímetro CTI-500 de la marca *JUMO* (39), aúna estos dos tipos de medidas de forma simultánea en su dispositivo.

El modo de medida del conductímetro se realiza mediante una medida inductiva. Una célula de medición inductiva consiste en dos bobinas, una transmisora y otra receptora. Ambas

bobinas están integradas en un alojamiento hueco. El alojamiento se sumerge en el fluido, que inunda su interior. A continuación se aplica una tensión alterna sinusoidal a la bobina transmisora. Esto produce una corriente en el fluido proporcional a su conductividad. A su vez, esta corriente induce una tensión en la bobina receptora. La conductividad se determina midiendo esta segunda tensión y conociendo la constante de la célula. El sistema integra también un sensor de temperatura que permite aplicar correcciones de temperatura. En resumen, emplea un método similar al utilizado por los caudalímetros electromagnéticos. Gracias a este tipo de medida, que evita el empleo de electrodos en un medio agresivo como es el agua marina, no se sufren problemas de corrosión.

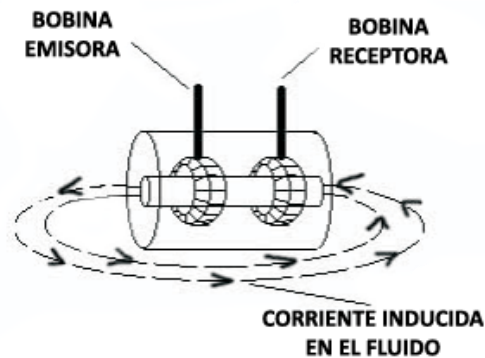
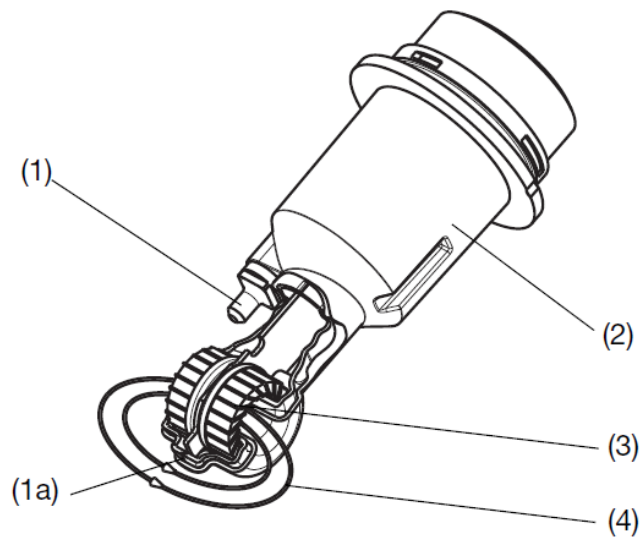


Imagen 3.51. Diagrama conceptual de medida inductiva de conductividad



- | | |
|---------------------------------|---|
| (1) Temperature sensor, exposed | (1a) optionally:
internal temperature sensor |
| (2) Measuring cell body in PP | (3) Measurement coils |
| (4) Liquid loop | |

Imagen 3.52. Diagrama detallado del sensor de conductividad y temperatura del CTI-500 (39)

El aparato es alimentado con un valor de 24 V DC y las lecturas, tanto conductividad como temperatura, las ofrece en el rango normal de 4-20 mA.



Imagen 3.53. Detalle de la instalación del conductímetro CTI-500

3.2.2.5. Balanza

Puesto que se consideró conveniente realizar un balance de masas del proceso, la inclusión de una balanza se convirtió en algo necesario. El modelo elegido fue la balanza FG-150KAL manufacturada por *A&D Company Ltd.* (40) y distribuida para España por *COBOS*. Dado que se deseaban incluir esta medida en el sistema SCADA, fue necesaria la adquisición de una tarjeta complementaria que el fabricante suministra para dotar de interfaz serie a la balanza: la OP-23.

Fue necesario realizar, en primer lugar, el montaje de los cables para el conector D-Sub 9 del equipo de adquisición, siguiendo el esquema facilitado por el fabricante (Imagen 3.56).

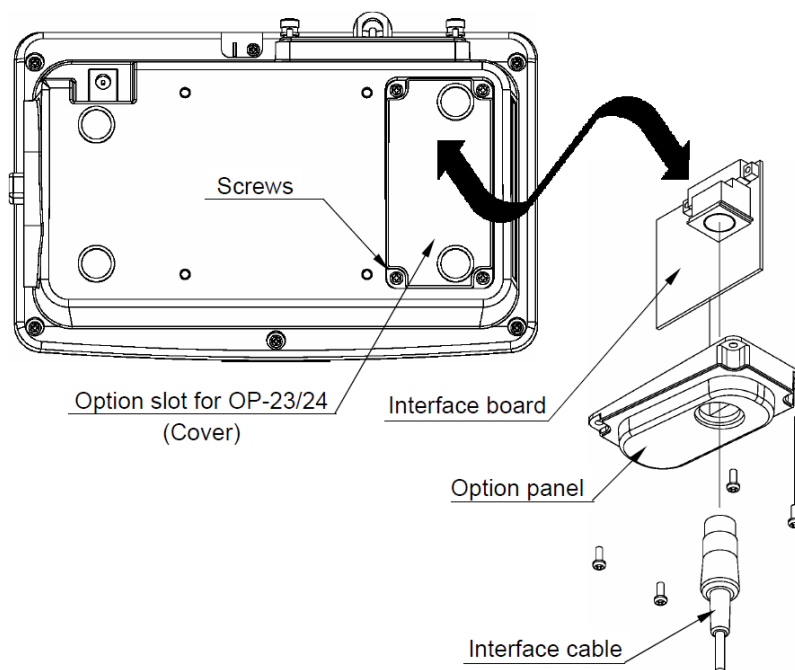


Imagen 3.54. Esquema de montaje del interfaz RS-232 de la balanza (40)

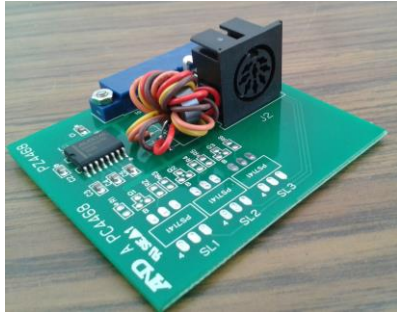


Imagen 3.55. Detalle de la tarjeta de interfaz serie

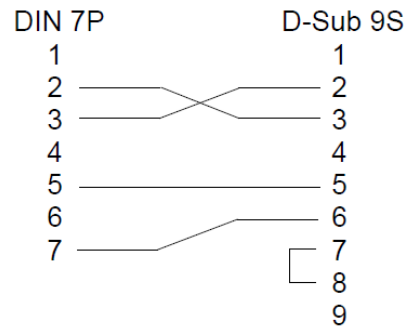


Imagen 3.56. Esquema de montaje del cable serie para la balanza (40)

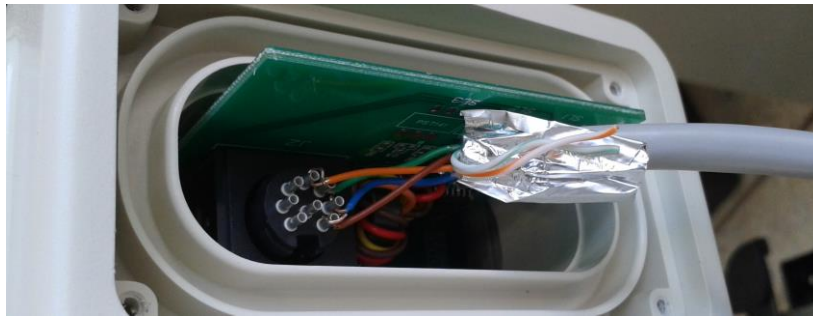


Imagen 3.57. Montaje en fase de pruebas del conector DIN 7P

En segundo lugar, se configuró la balanza en sus diferentes modos de funcionamiento:

- F1-0: Desactiva el modo *Auto power-off*, para evitar apagados indeseados.
- F3-2: Ofrece la lectura en kilogramos.
- F4-2: Fija a 9600 bps la velocidad de transmisión del puerto serie.
- F5-0: Publica de forma automática el peso por el puerto serie (*Stream mode*).

Por último, se programó en *LabVIEW* tanto la configuración del puerto serie, como la recepción de los datos siguiendo el formato detallado por el fabricante.

Transmission system	EIA RS-232C
Transmission form	Asynchronous, bi-directional, half-duplex
Data format	Baud rate: 2400, 4800, 9600 bps
	Data: 7 bits + parity 1bit (even)
	Start bit: 1 bit
	Stop bit: 1 bit
	Code: ASCII
	Terminator: C_{RLF} (C_R : 0Dh, L_F : 0Ah)

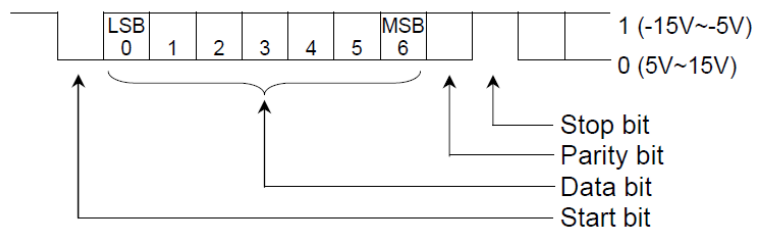
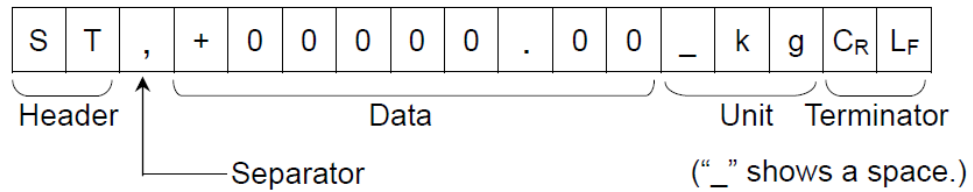


Imagen 3.58. Especificaciones del interfaz EIA RS-232C (40)



- ✍ There are 4 types of headers:
 - ST : Stable weighing data
 - QT : Stable counting data
 - US : Unstable weighing data (including counting data)
 - OL : Out of weighing range (Over)

- ✍ The data is normally 9 digits including decimal point and a sign.

- ✍ There are 4 types of units:
 - _ k g : Weighing data “gram”
 - _ P C : Counting data “pcs”
 - _ l b : Weighing data “decimal pound”
 - _ o z : Weighing data “decimal ounce”

- ✍ The terminator is always C_RL_F.

Imagen 3.59. Formato de los datos en el interfaz RS-232C (40)



Imagen 3.60. Instalación de la balanza en la SolarSpring

3.2.3. Descripción del sistema de actuación

Hasta ahora, se han descrito los sistemas que nos ofrecían información de los procesos de la planta. Pero en este epígrafe ha llegado la hora de pasar a la acción. Le toca el turno a los actuadores, aquellos que nos permitirán intervenir y controlar los procesos que acontecen en la instalación. Igual que en el punto 3.2 se detallarán los actuadores presentes en la planta.

3.2.3.1. Bombas

Las tres bombas emplazadas en la instalación del Campo Solar (P-1, P-2 y P-3) son el modelo Solar 25-120 de la marca GRUNDFOS (41). Su principal característica es ofrecer un bajo consumo en los rangos de funcionamiento de bajos caudales, como son los empleados en los procesos tratados en este trabajo.

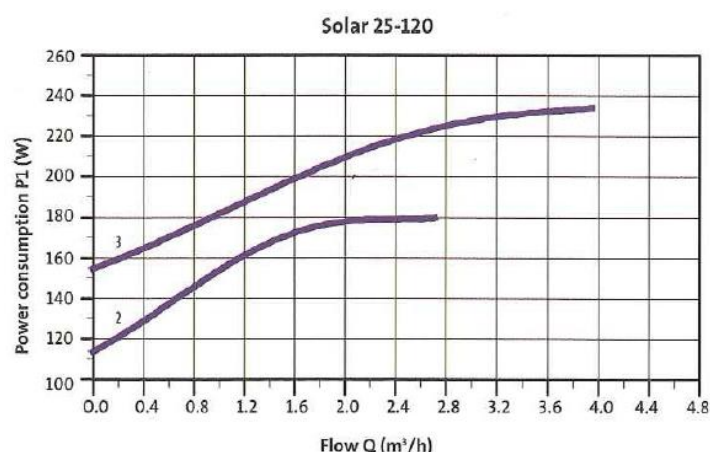


Imagen 3.61. Curvas de consumo en relación al caudal solicitado (41)

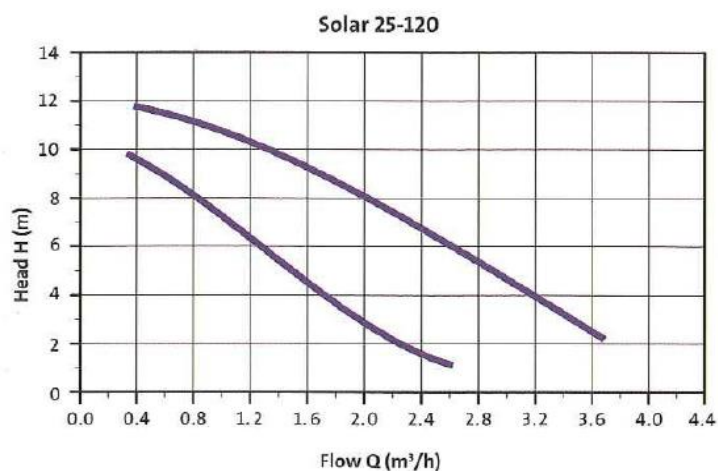


Imagen 3.62. Curvas de pérdida de presión en función del caudal demandado (41)

Son alimentadas a 230 VAC y cabe reseñar que desde el sistema de control se controlarán directamente las bombas, si no que se actúa directamente sobre los variadores de frecuencia que las regulan.



Imagen 3.63. Instalación de la bomba P-1 modelo SOLAR 25-120

3.2.3.2. Variadores

Como se ha adelantado, los variadores de frecuencia son los encargados de controlar el funcionamiento de las bombas. Se encuentran instalados en el cuadro de alimentación, para evitar perturbaciones innecesarias en el cuadro de control. Se trata de 4 variadores modelo OPTIDRIVE E² de la marca INVERTEK (42), donde 3 de ellos controlaran las 3 bombas del grupo hidráulico y una cuarta será la encargada de gobernar el motor del Aerotermo. El empleo de variadores es debido a que, los motores de las bombas y ventiladores trabajan con amperajes incompatibles con la electrónica de control y adquisición. Por otro lado, su uso mejora el consumo que podría darse de un control puramente resistivo.



Imagen 3.64. Instalación de los variadores en el cuadro de alimentación

El control de estos dispositivos se realiza desde 4 terminales de control:

- Terminal 1 y 2: Estos terminales son los encargados de habilitar y deshabilitar el variador en cuestión. Desde el cuadro de control, se gobierna un relé mediante una salida digital que abrirá o cerrará el contacto aplicando, o no, una tensión de 24 V.

- Terminales 6 y 7: Con un rango de variación de 0 a 10 V, son los encargados de fijar la frecuencia y por tanto la velocidad de giro de las bombas. En el manual sugieren el empleo del terminal 5 que es una salida de 10 V y un potenciómetro de 10 KΩ. Pero como disponemos de módulos de salidas analógicas de tensión, simplemente una de estas salidas por cada variador, fijaran de forma dinámica e independiente la velocidad de las bombas.

Conexiones de fábrica	Control Terminal	Señal	Descripción
	1	Salida +24V,	+24V, 100mA.
	2	Entrada digital 1	Lógica positiva
	3	Entrada digital 2	"Logic 1" rango voltaje de entrada: 8V ... 30V DC
	4	Entrada digital 3 / Entrada analógica 2	"Logic 0" rango voltaje de entrada: 0V ... 4V DC
	5	Salida +10V	Digital: 8 a 30V Analógica: 0 a 10V, 0 a 20mA o 4 a 20mA
	6	Entrada analógica 1 / Entrada digital 4	+10V, 10mA, 1kΩ mínimo
	7	0V	Analógica: 0 a 10V, 0 a 20mA o 4 a 20mA Digital: 8 a 30V
	8	Salida analógica / Salida digital	Masa conectado a terminal 9
	9	0V	Analógica: 0 a 10V, 20mA máximo Digital: 0 a 24V
	10	Relé común	Masa conectado a terminal 7
	11	NO contacto relé	
			Contacto 250Vac, 6A / 30Vdc, 5A

Imagen 3.65. Conexionado de control (42)

3.2.3.3. Válvulas de retención

La función de las válvulas de retención es únicamente de seguridad. Poseen un elevado par (450 N), lo que garantiza su cierre ante cualquier presión en la instalación. Pero su tiempo de maniobra es muy lento (15 s/mm), lo que en su recorrido de 15mm, nos deja 3 minutos y 45 segundos para completar una apertura o cierre. Además se buscó un modelo que frente a un fallo eléctrico general, se cerraran automáticamente, mediante el empleo de un muelle de retorno. El modelo seleccionado fue AMV 25 SU de *Danfoss* (43). Las dos válvulas de retención presentes en la instalación (RVA y RVB) se encuentran instaladas en la admisión de P-1 y P-2.

Ambas funcionan con alimentación de red 230 VAC, no sólo el motor, sino además las señales de control. Esto presenta un grave problema, pues no se dispone de señales de esas características en nuestros módulos de control. Por eso surgió la necesidad de incluir relés para actuar sobre las entradas y adaptar las salidas de la válvula, como se verá en el apartado 3.2.3.6 dedicado a los relés.

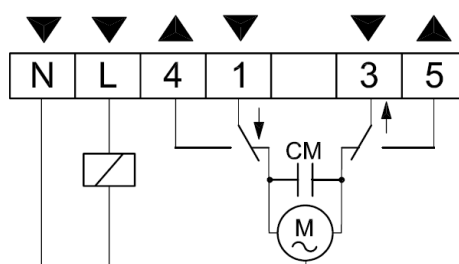


Imagen 3.66. Esquema de conexiones eléctricas para las válvulas de retención (43)

Funcionamiento:

- Cuando se conecta la alimentación en el terminal 1 la válvula comienza a abrirse y por 4 y 5 no hay tensión.
- Una vez llegado al final de carrera de la apertura, aparecen 230VAC por el terminal 4 para indicarlo.
- Si se conmuta la alimentación al terminal 3 la válvula comienza a cerrarse y durante la maniobra no hay tensión nuevamente en los terminales 4 y 5.
- El terminal 5 se pondrá en tensión una vez completado el cierre de la válvula.

En estas válvulas no se puede operar de forma proporcional, es decir, no es posible detener la maniobra de apertura o cierre en cualquier punto y trabajar con una apertura del 50%, por ejemplo. Siempre que no se mantenga la tensión de red en el terminal de apertura, la válvula por defecto retornará a la posición de cerrado.

Si todo funciona correctamente durante el proceso de destilación y no ocurre ningún fallo irreparable, tanto RVA como RVB, se abrirán al comienzo del proceso y sólo se cerrarán al finalizar el mismo.



Imagen 3.67. Detalle de la instalación de la válvula de retención RVB

3.2.3.4. Válvulas proporcionales

Existen instaladas dos válvulas proporcionales en la planta (V1 y V5). Su función principal es la de poder seleccionar fracciones de un caudal de entrada y repartirlo entre sus dos salidas de forma controlada. El modelo de actuador seleccionado de la marca *Danfoss*, es el AME 435 (44). Funciona con una tensión de alimentación de 24 VDC, posee una fuerza de cierre de 400 N y una velocidad seleccionable de 7,5 s/mm o 15 s/mm. Además de la velocidad hay una serie de características configurables a través de un micro *switch*.

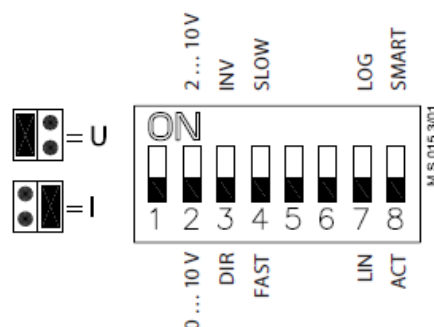


Imagen 3.68. Switch de configuración de las válvulas proporcionales (44)

Jumper:

- U/I – Selecciona el tipo de señal de entrada. Si se coloca en la posición U, se selecciona la entrada en voltaje. Si se coloca en la posición I, se selecciona la entrada en corriente.

Switch:

- SW 1: No usado.
- SW 2: Selecciona el rango de la señal de entrada. Si se coloca en OFF el rango para tensión sería de 0-10 V y para corriente 0-20 mA. Si se coloca en ON el rango para la tensión pasaría a ser de 2-10 V y para corriente de 4-20 mA.
- SW 3: Selecciona el modo directo o inverso de funcionamiento para el actuador. Si se coloca en OFF trabaja en modo directo, respondiendo a un incremento de señal de entrada con un incremento a la salida y viceversa. Si por el contrario se coloca en ON, se activa el modo inverso, para incrementos de la entrada, se obtendría un decremento en la salida y viceversa.
- SW 4: Selección de velocidad Rápido/Lento. Si se coloca en OFF la velocidad será de 7.5 s/mm (FAST). Si se activa en ON, la velocidad se fija en los 15 s/mm (SLOW).
- SW 5: No usado.
- SW 6: No usado.
- SW 7: Selecciona el tipo de respuesta del actuador en lineal o logarítmica. Si se selecciona la posición OFF, la respuesta del actuador será lineal con la entrada. Por el contrario, en ON la respuesta ofrecida por el actuador se comportará de forma logarítmica con la entrada.
- SW 8: Selector de la función *Smart*. Si se coloca en OFF la posición del actuador no trata de detectar oscilaciones en el sistema y de corregirlas. Si se coloca en ON se activará un algoritmo especial en el actuador para evitar oscilaciones.



Imagen 3.69. Cableado de la válvula proporcional V1

Una vez configurado, el modo de funcionamiento es bien simple. Por el terminal de entrada Y se conecta una salida de nuestros módulos de control de tensión, fijando su rango de variación de 0 a 10 V. Al mismo tiempo en el terminal X podremos observar la respuesta (también en el rango de 0 a 10 V) del actuador a la consigna marcada, quedando recogida dicha respuesta por el módulo de adquisición de tensión dispuesto para ello.

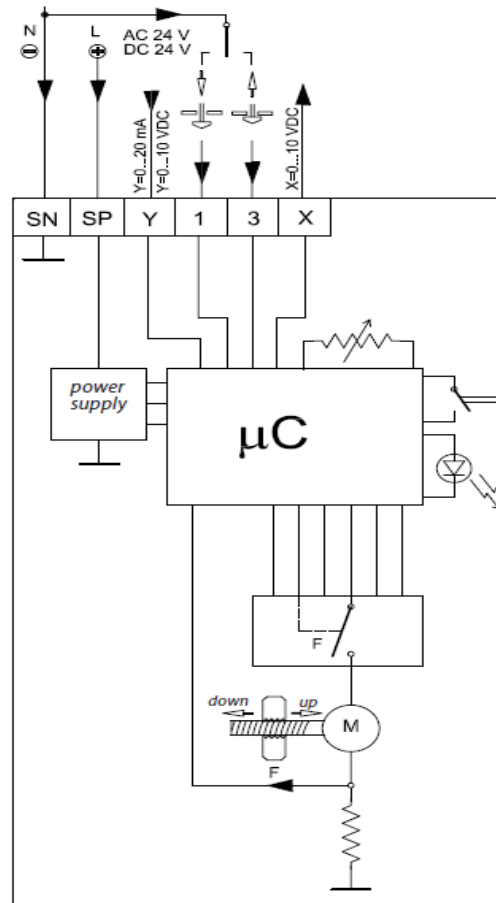


Imagen 3.70. Esquema de funcionamiento del actuador AME 435 (44)



Imagen 3.71. Detalle de instalación de V5

3.2.3.5. Válvula todo/nada

En todo el circuito hidráulico de la instalación tan sólo existe una válvula de este tipo, V2, que como se ha visto es la encargada de seleccionar la circulación del caudal a través del campo solar o bien dirigirlo hacia el Acumulador. No posee realimentación como las proporcionales, o la solución con los relés de las válvulas de retención. Sólo se conoce que su tiempo de maniobra es de 60 segundos. Por lo cual, debe supervisarse el resto de variables y sensores de la instalación para comprobar que efectivamente se cumple.

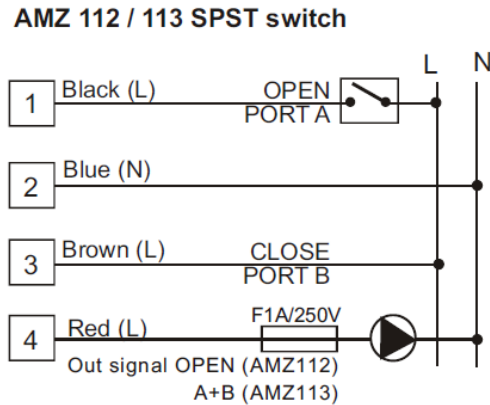


Imagen 3.72. Configuración eléctrica del actuador AMZ 113 (45)

Nuevamente se elige un modelo de la casa Danfoss, el AMZ 113 (45). Su alimentación y operación también es de 230 VAC como el caso de las válvulas de retención, por lo cual, nos vemos obligados al empleo de un nuevo relé para poder adaptar la señal como queda reflejado en la configuración eléctrica.

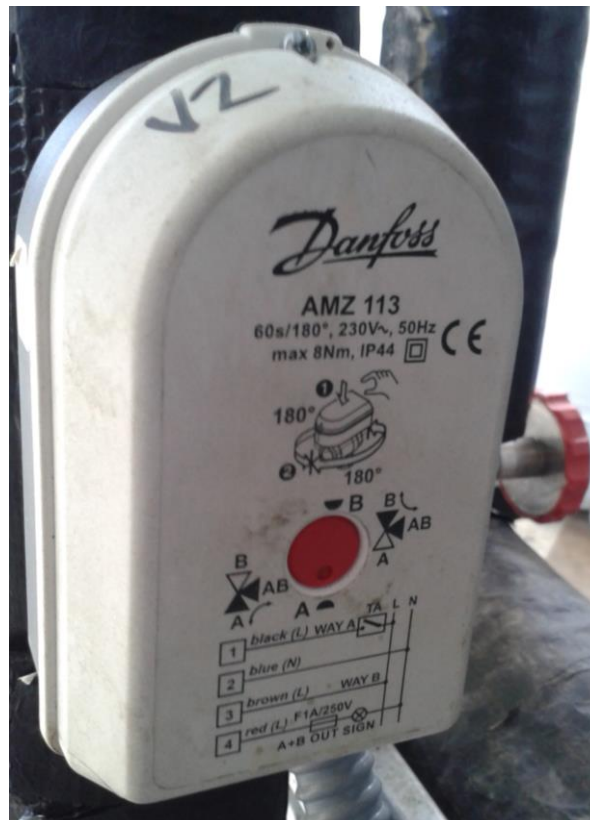


Imagen 3.73. Detalle de instalación de la válvula V2

3.2.3.6. Relés

Como se ha venido adelantando, y para terminar el capítulo de actuadores, ha sido necesario el empleo de relés. Esta necesidad fue fruto de la incompatibilidad de tensiones entre algunos actuadores o circuitos de potencia y el sistema de control.

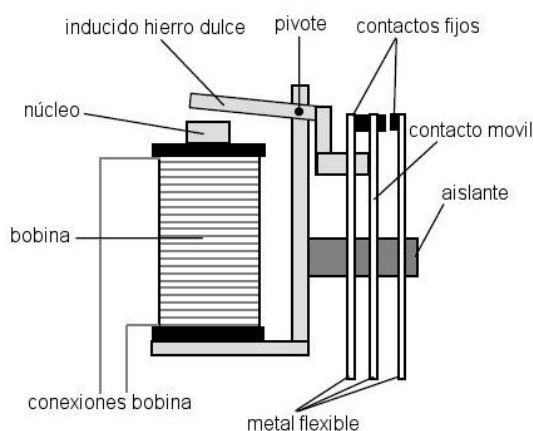


Imagen 3.74. Diagrama de funcionamiento de un relé

El relé es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.

Para resolver el problema de la incompatibilidad de niveles y potencia, se incluyeron dos tipos de relés del fabricante *Schneider* (46):

- Entradas del circuito de potencia: En estas fue necesario emplear relés cuyo interruptor estuviese gobernados por una bobina a 24VDC para poder actuar sobre las entradas a 230 VAC.
- Salidas del circuito de potencia: Se aplicaron relés con interruptores controlados por bobinas de 230VAC para adaptar las salidas de los actuadores a los 24 V de la lógica de control.

En las siguientes imágenes se puede apreciar el detalle de los relés de control empleados en las válvulas de retención RVA y RVB. Donde para el control de una válvula fue necesario emplear tres relés. El primero de 24 VDC para controlar la entrada de maniobra (Abriendo o Cerrando) y los siguientes de 230 VAC para recoger el valor de las salidas de los finales de carrera (Abierto o Cerrado).



Imagen 3.75. Relés de control para la válvula de retención RVA



Imagen 3.76. Relés de control para la válvula de retención RVB

3.2.4. Arquitectura hardware y software de la red

Bajo este epígrafe se va a realizar la conexión completa del sistema de medida y actuadores a los módulos de adquisición, los cuales a su vez interactúan con el equipo que ejecuta la herramienta SCADA. Finalizará con el apartado donde se habla del software empleado para la configuración de toda esta red.

3.2.4.1. Hardware

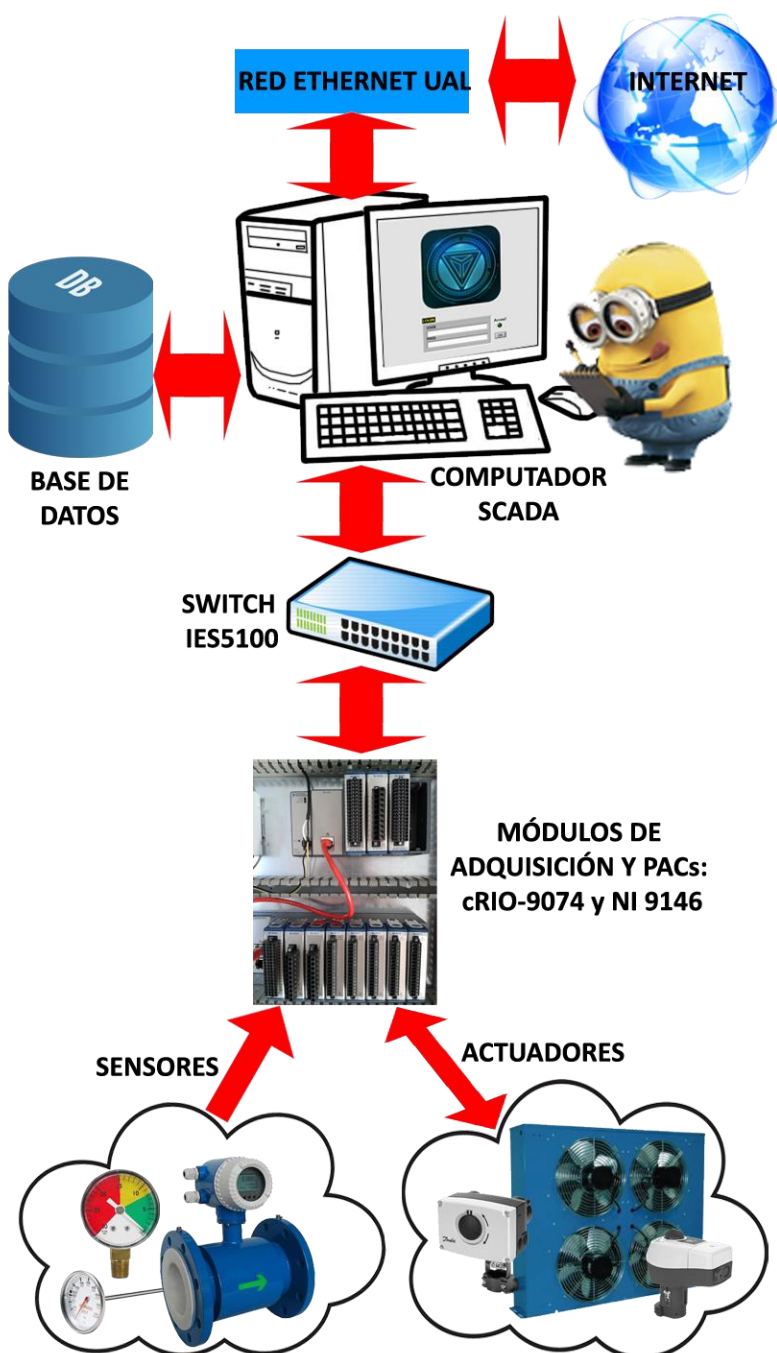


Imagen 3.77. Estructura hardware de la red

Como se muestra en la imagen anterior, la estructura de la red es una configuración básica de una subred aislada, dentro de las instalaciones de la Universidad de Almería. Todas las variables son suministradas por los PAC de NI y registradas por el computador en una base de datos.

Atendiendo a la denominada Pirámide de la automatización, CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), intenta resumir, de forma gráfica, la estructuración de los sistemas de comunicación en un entorno productivo.

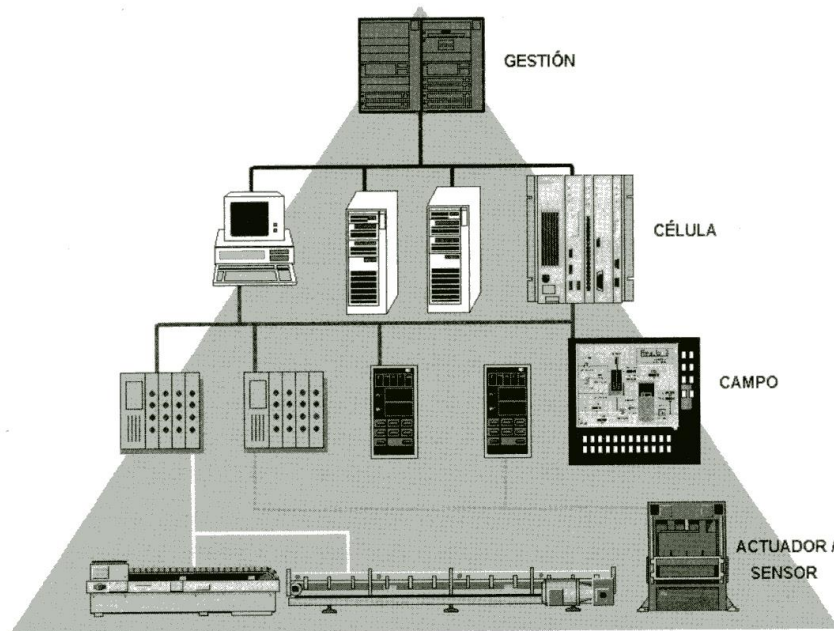


Imagen 3.78. Pirámide CIM (47)

Se divide en niveles que clasifican el tipo de tráfico e información que se intercambia entre cada uno:

- **Nivel de Gestión:** Procesa tareas de tipo corporativo que implican, generalmente, grandes cantidades de información (administración).
- **Nivel de Célula:** Procesa las tareas de automatización. Aquí aparecen los Autómatas, PCs y equipos de visualización. La transferencia de información es considerable, aumentando el tamaño de los paquetes de información y el tiempo de tránsito necesario para la transmisión de estos. Ya no es importante la rapidez, prima más la seguridad del envío.
- **Nivel de Campo:** Realiza la unión entre las instalaciones y los equipos que las controlan. Permite la comunicación entre los equipos de control de maquinaria y los equipos del nivel de célula.
- **Nivel Actuador/Sensor:** En cualquier aplicación automatizada tenemos multitud de elementos que requieren uno o algunos bits de información (de entrada o salida) para trabajar (pulsadores, selectores, sensores, pilotos). Esta característica es la que define el nivel Actuador/Sensor (pocos bits) dentro de un sistema automatizado (47).

El nivel de la planta tratada en este TFG, donde no existe nivel de Gestión, alcanzaría hasta el de Célula, el cual englobaría toda la instalación. En la cúspide de la pirámide en este trabajo se encontraría en el computador que ejecuta el SCADA y procesa los datos de la Base de Datos.

3.2.4.1.1. Computador SCADA

La elección de este componente fue relativamente delicada, puesto que aunque se debía adquirir un equipo que soportase el entorno de programación *LabVIEW* de última versión y el manejo de la base de datos, no tenía sentido sobredimensionar un equipo de elevadas prestaciones para trabajar como monitor de procesos y base de datos.

Por estas razones, se llegó al compromiso entre coste y rendimiento, decantándonos por el microprocesador Intel Pentium G3220 con dos núcleos a 3.00 GHz y montado en un sistema con 2 Gb de memoria RAM.

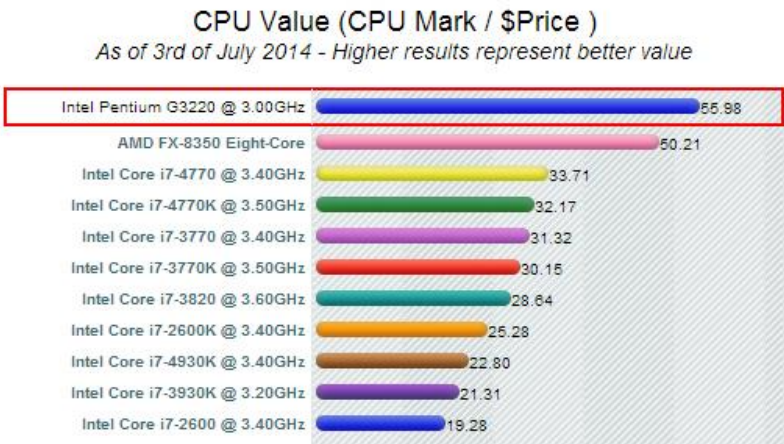


Imagen 3.79. Comparativa rendimiento/precio para el micro G3220

Por otro lado, fue necesaria la instalación de una segunda tarjeta de red, además de la incluida en la placa base, para poder aislar el sistema en una segunda intranet y al mismo tiempo disponer de la capacidad de salir a internet por la única dirección IP asignada a la instalación. Como se puede observar la única ranura de expansión disponible era una PCI-e, slot donde se ubicó forzosamente el nuevo dispositivo.

La carcasa del equipo no posee ningún índice de protección y se trata de una torre normal de ordenador doméstico, a pesar de estar instalado en un ambiente con elevadas temperaturas y humedad. La apuesta por abaratar costes en este aspecto, es otro de los factores que entran en los experimentos paralelos de las instalaciones (obsolescencia programada).

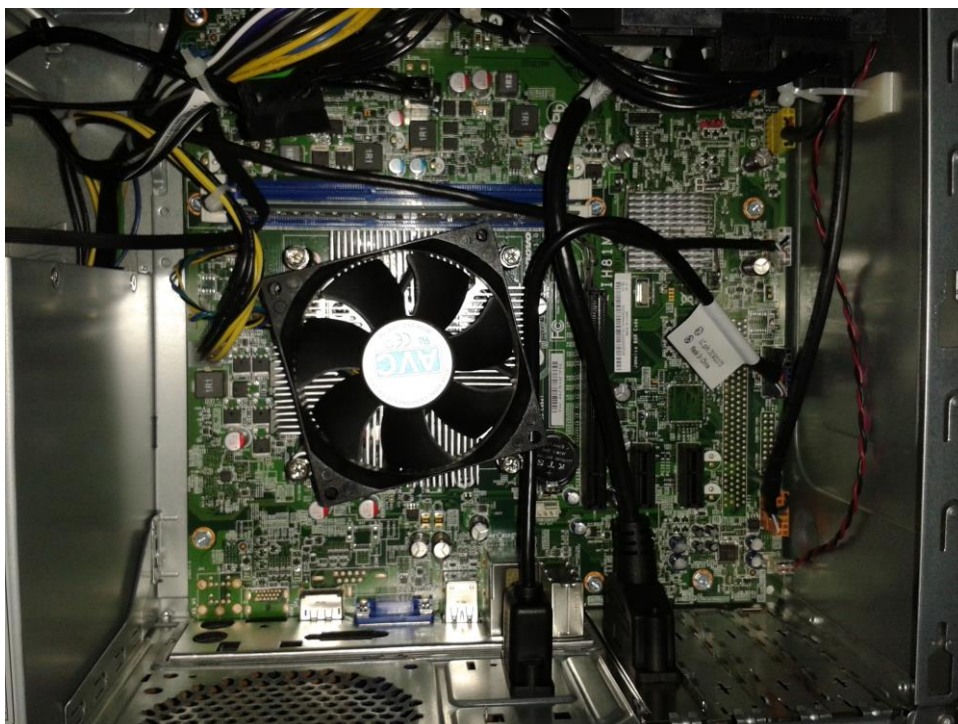


Imagen 3.80. Detalle de la placa base del computador SCADA

3.2.4.1.2. cRIO-9074

El PAC *CompactRIO* (*Compact Reconfigurable Input/Output*) es un sistema robusto de control y adquisición industrial que incluye E/S reconfigurables mediante FPGAs para conseguir las máximas prestaciones y un alto grado de personalización. *CompactRIO* incorpora un procesador en tiempo real y una FPGA reconfigurable para desarrollar aplicaciones embebidas o distribuidas, y módulos industriales de E/S intercambiables en funcionamiento, que además incluyen el acondicionamiento de señal para su conexión directa a sensores y actuadores. Se trata, por tanto, de una arquitectura de bajo coste con acceso directo a los recursos hardware de bajo nivel (24).

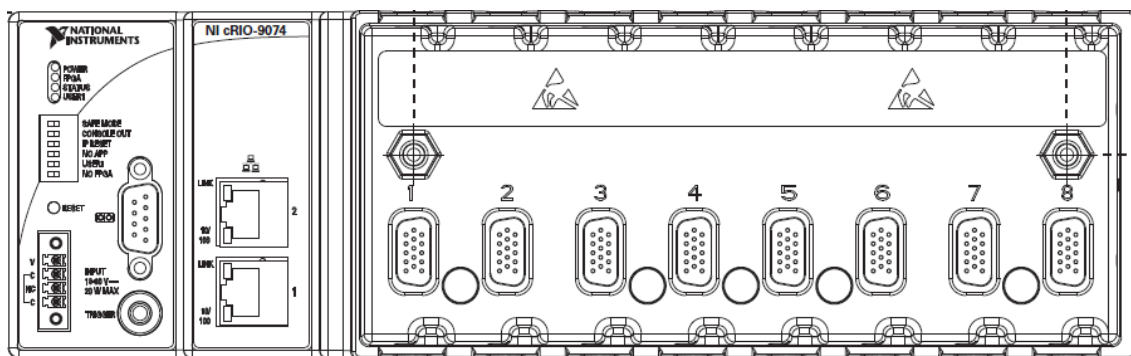


Imagen 3.81. Esquema del chasis cRIO-9074 (48)

El modelo *cRIO-9074* (48), de ocho slots de expansión para módulos de E/S, cuenta con 256 Mb de memoria no volátil y 128 Mb de memoria RAM. Posee un puerto serie y para la comunicación con el equipo de monitorización emplea una de las conexiones Ethernet de las que viene provisto. Necesita una alimentación de 24 VDC y posee un consumo de 20 W todo esto ya viene previsto por el fabricante que aporta una fuente de alimentación para el conjunto.

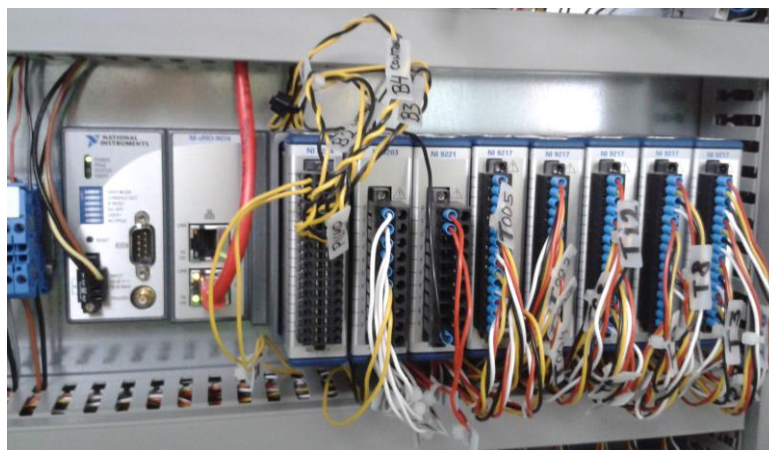


Imagen 3.82. Instalación del cRIO-9074 con todos sus módulos de E/S

3.2.4.1.3. NI 9146

El chasis de expansión NI 9146 (49) podría considerarse el hermano pequeño del cRIO-9074. Posee tan sólo 4 slots de expansión y un solo puerto Ethernet que emplea de forma similar para gestionar todo el tráfico de datos con los equipos de monitorización. No tiene la posibilidad de conectar periféricos con interfaz serie, ya que carece de este tipo de puerto. La alimentación del sistema es similar y dado su consumo de 15W se alimenta con la misma fuente de alimentación (de 50W) que el cRIO-9074.

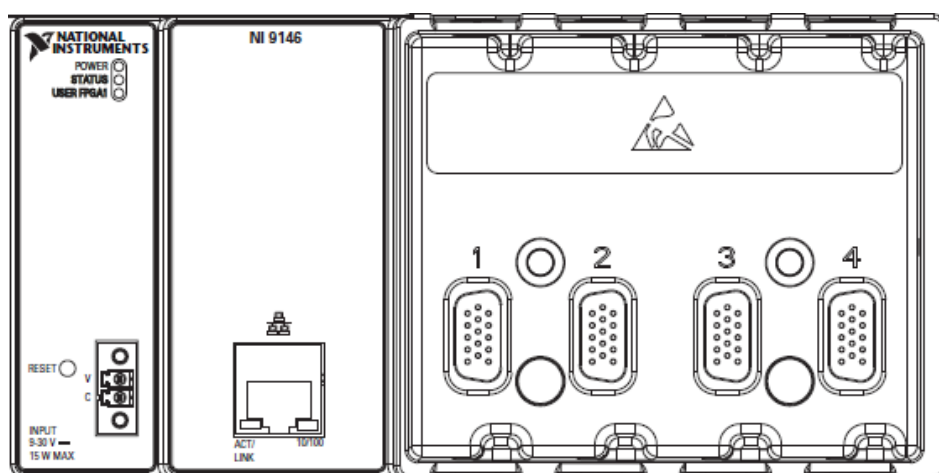


Imagen 3.83. Esquema del chasis NI 9146 (49)



Imagen 3.84. Instalación del NI 9146 con sus módulos de E/S

3.2.4.1.4. Switch Industrial IES5100

El corazón de la red Ethernet de comunicaciones, sobre la cual se realizan todo el tráfico de la planta, es el *switch* industrial de 5 puertos IES5100 del fabricante *StarTech* (50). Este *switch* posee un rango de funcionamiento en temperatura desde los -10°C hasta los 60°C y humedad no condensada desde el 5% al 95%, lo cual lo hace idóneo para el entorno de altas temperatura y humedad en el que va a trabajar. Por lo demás es un *switch* normal, cumple con el estándar IEEE 802.3 10Base-T y soporta funciones de auto negociación 10/100Base TX y *Full-Duplex*. Por lo demás, se alimenta con 24 VDC proveniente de la fuente de alimentación del cuadro de control y posee un montaje en carril DIN como se puede apreciar en la siguiente imagen.



Imagen 3.85. Detalle del montaje del switch IES5100 en el cuadro de control

3.2.4.1.5. NI 9221

El módulo NI 9221 (29) posee 8 canales de entrada analógica de tensión. Dicha entrada tiene un rango de lectura de $\pm 60\text{ V}$. Las entradas se encuentran multiplexadas como se describió en el capítulo 2 de este documento y posee un convertor analógico-digital de 12 bits. Y como podemos observar, la tierra es común para todas las entradas. El único módulo disponible se encuentra instalado en el cRIO-9074. Con él recibimos la señal de posición de las válvulas proporcionales V1 y V5.

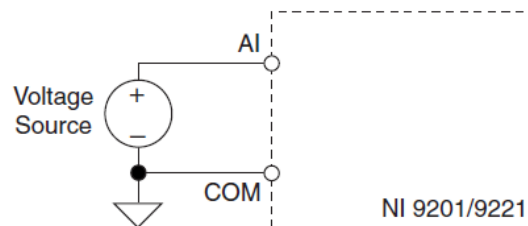


Imagen 3.86. Detalle de conexión de una fuente de señal en tensión (29)

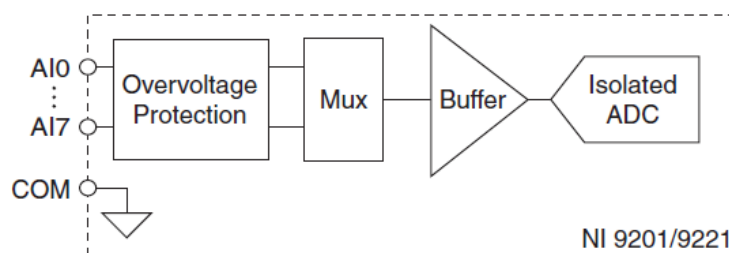


Imagen 3.87. Circuito de entrada del módulo NI 9221 (29)

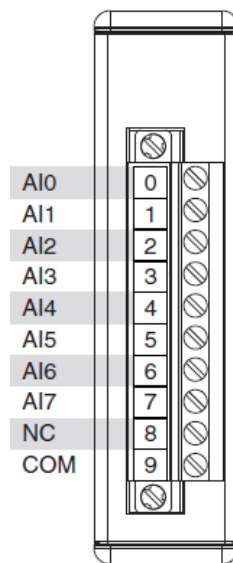


Imagen 3.88. Asignación de terminales del NI 9221 (29)

3.2.4.1.6. NI 9217

El módulo NI 9217 (51) posee 4 canales de entrada analógica para RTDs de 100 Ω . Dichas entradas son las encargadas por tanto de medir la temperatura de todas las sondas de estas características de las instalaciones. Tiene la capacidad de poder realizar medidas a 3 y 4 hilos, pero nosotros sólo empleamos la configuración de 4 por ofrecer mejores prestaciones. Las cuatro entradas se encuentran multiplexadas y posee un conversor analógico-digital de 24 bits. Existen 5 módulos instalados en el cRIO-9074.

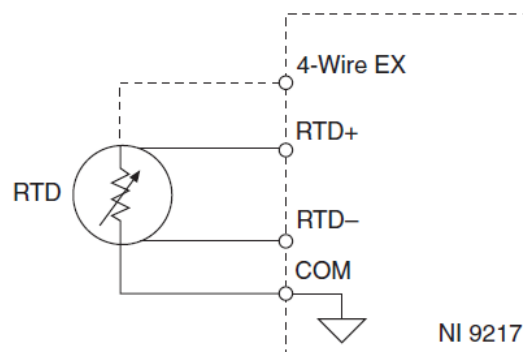


Imagen 3.89. Detalle de conexión de una RTD a un canal del NI 9217 (51)

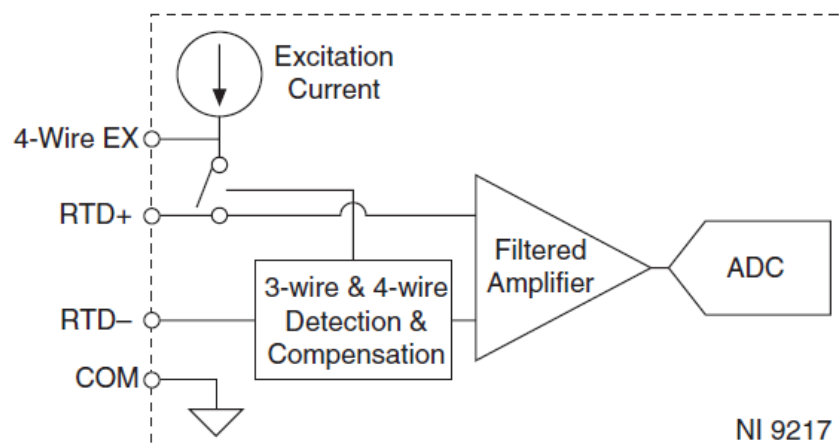


Imagen 3.90. Circuito de entrada del módulo NI 9217 (51)

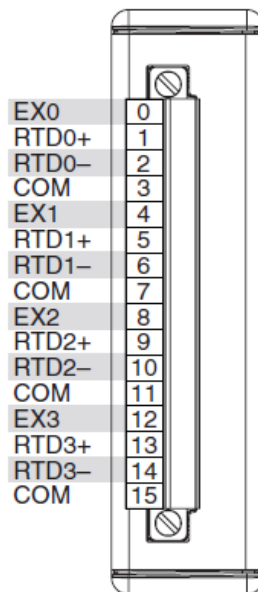


Imagen 3.91. Asignación de terminales del NI 9217 (51)

3.2.4.1.7. NI 9203

El módulo NI 9203 (52) posee 8 canales de entrada analógica de corriente. Dicha entrada tiene un rango de lectura de ± 20 mA. Las entradas se encuentran también multiplexadas y posee un conversor analógico-digital de 16 bits. Como se puede observar en los diagramas, la tierra es común para todas las entradas. Esta característica, como se explicó en la sección 3.1, obliga a que todos los sensores sean alimentados con la misma fuente de alimentación, para de este modo poder asegurar una tierra común a todos y evitar lazos de corriente. Estos lazos en el mejor de los casos nos provocarían errores en las medidas y pueden llegar a destruir la electrónica de adquisición.

Los dos módulos disponibles se encuentran repartidos, uno en el cRIO-9074 para medir todos los caudalímetros del grupo hidráulico y el otro en el NI 9146, encargado de recoger la información de los sensores de la *SolarSpring*.

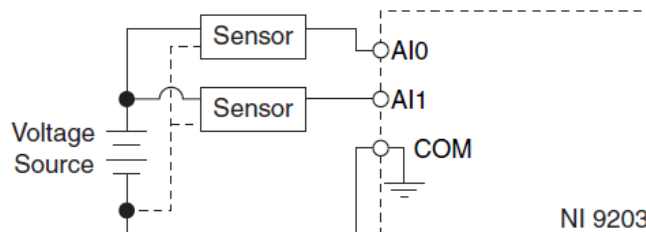


Imagen 3.92. Detalle de conexión de dos sensores al NI 9203 (52)

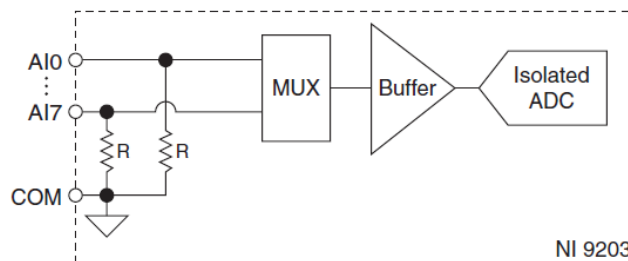


Imagen 3.93. Circuito de entrada del módulo NI 9203 (52)

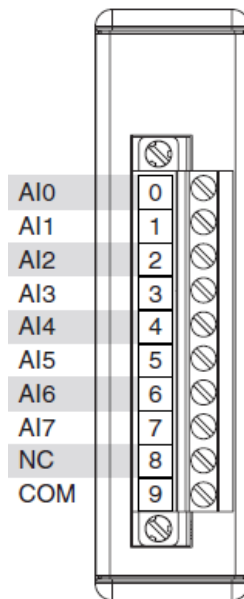


Imagen 3.94. Asignación de terminales del NI 9203 (52)

3.2.4.1.8. NI 9264

El módulo NI 9264 (53) posee 16 canales de salidas analógicas de tensión. Dichas salidas tienen un rango de operación de ± 10 V. Las salidas se encuentran multiplexadas y posee un convertor digital-analógico de 16 bits. Como se puede observar, la tierra es común para todas las salidas del dispositivo. El único módulo disponible se encuentra instalado en el cRIO-9074. Su función principal es la de fijar tensiones de control en los dispositivos como bombas, válvulas, etc.

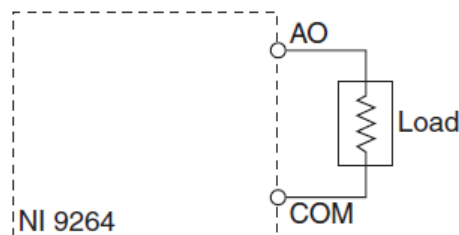


Imagen 3.95. Detalle de conexión de una carga a la salida del NI 9264 (53)

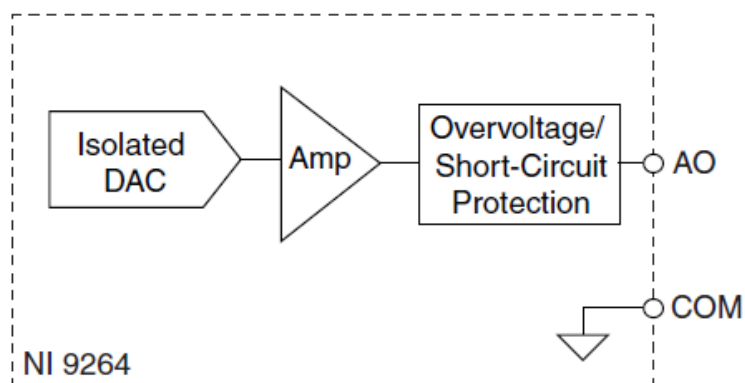


Imagen 3.96. Circuito de salida del módulo NI 9264 (53)

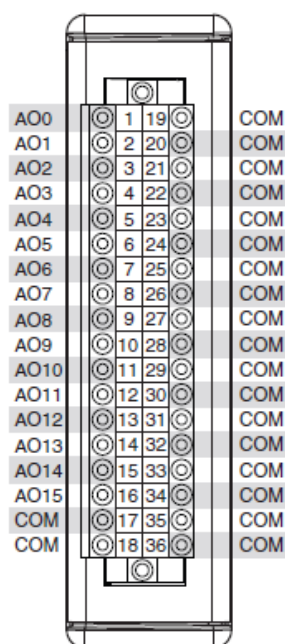


Imagen 3.97. Asignación de terminales del NI 9264 (53)

3.2.4.1.9. NI 9375

El módulo NI 9375 (54) posee 32 canales digitales, de los cuales 16 canales son de salida y los restantes 16 de entrada. Dichas entradas tienen un rango de operación de 0 a 30 VDC (24 VDC recomendados). Sin embargo las salidas, como se analizará posteriormente, depende de la tensión de la fuente que se conecte, puesto que la labor de las mismas es simplemente la de contactores. De forma interna existen dos posibles tierras, una para las salidas y otra para las entradas. Los dos módulos disponibles se encuentran instalados en el chasis de expansión NI 9146. Con esos módulos conseguimos mandar la señal de ON/OFF a los variadores, además de controlar mediante relés las válvulas RVA, RVB y V2.

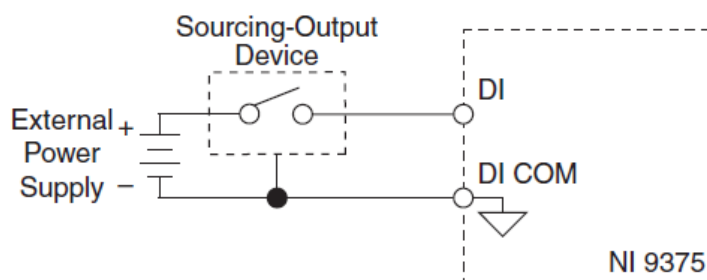


Imagen 3.98. Detalle de conexión de una entrada digital al NI 9375 (54)

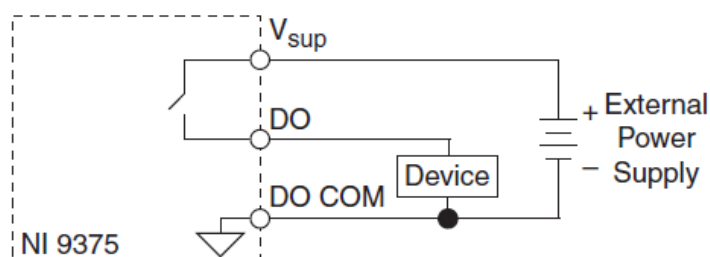


Imagen 3.99. Detalle de conexión de una salida digital al NI 9375 (54)

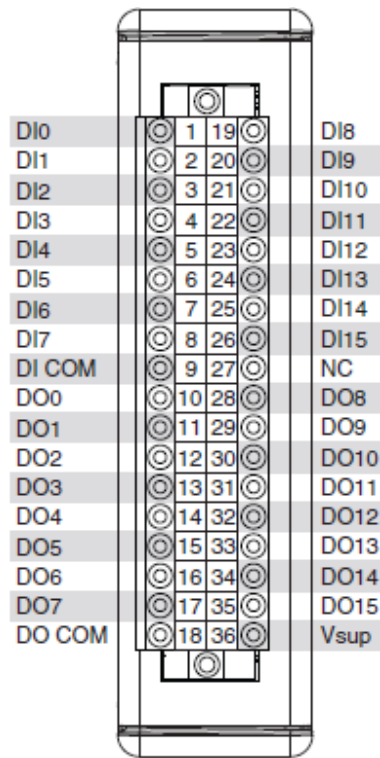


Imagen 3.100. Asignación de terminales del NI 9375 (54)

3.2.4.2. Software

Gracias a lo simple de la red abordada y a poseer una solución integral de hardware y software de un mismo fabricante, sólo fue necesario emplear el programa de NI MAX (*Measurement & Automation Explorer*). Este software se instala automáticamente con el software y los controladores de dispositivos del instrumento y proporciona el acceso a su configuración. Desde él se puede:

- Configurar el hardware y software de NI.
- Crear y editar canales, tareas, interfaces e instrumentos virtuales.
- Ejecutar diagnósticos del sistema y los paneles de prueba de ejecución.
- Ver los dispositivos e instrumentos conectados al sistema.
- Actualizar el software de NI.

El computador SCADA se conecta a internet mediante una dirección IP fijada por la red Ethernet interna de la Universidad de Almería. Mediante una segunda tarjeta de red se fija la dirección IP de la red interna.

En primer lugar, utilizando las Propiedades de Red de Windows, se determina la dirección del ordenador de la planta en: 192.168.149.10.

Ahora sólo falta resetear los chasis de NI, el cRIO-9074 y el NI 9146 y entrar al MAX para configurar tanto los equipos como la red.

Las siguientes figuras resumen el procedimiento de configuración.

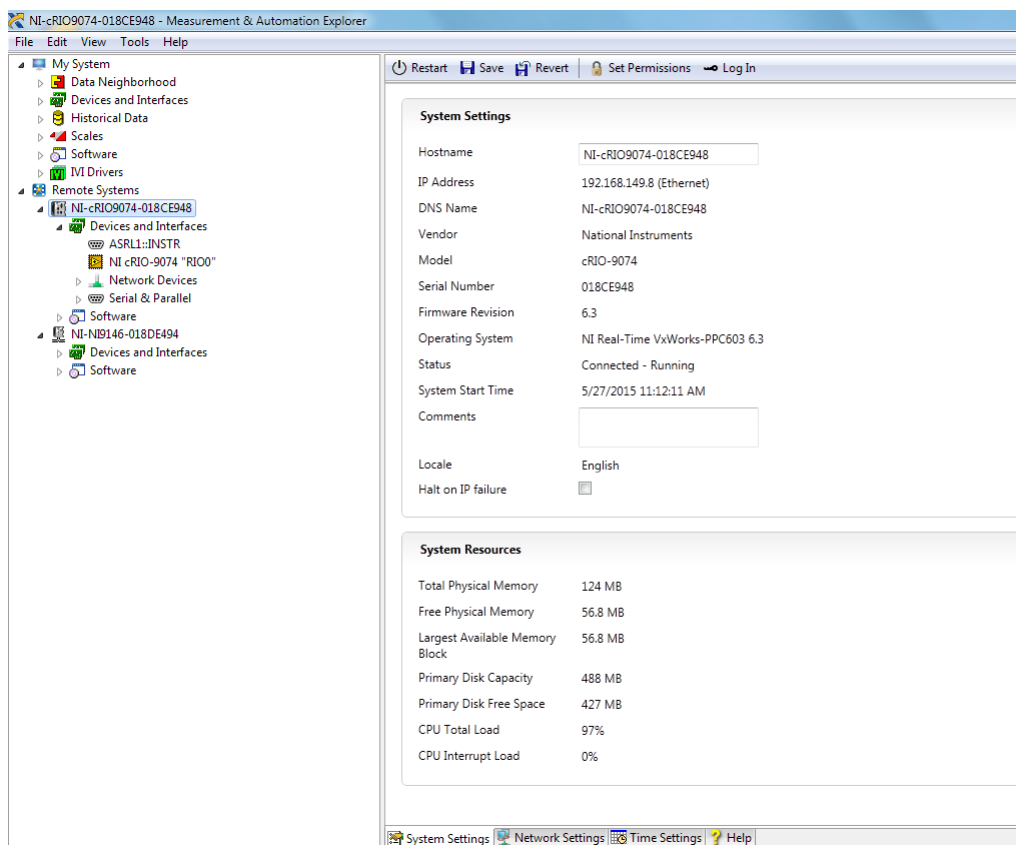


Imagen 3.101. Configuración desde el MAX del cRIO-9074

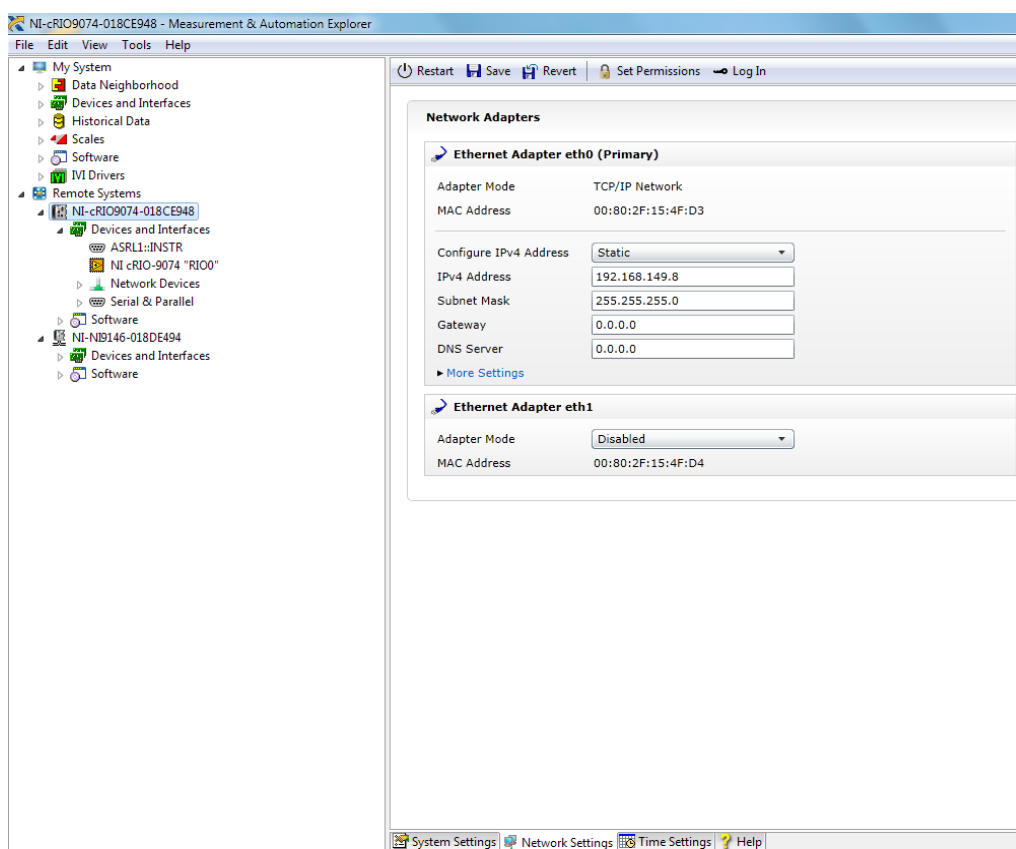


Imagen 3.102. Configuración de la dirección IP del cRIO-9074

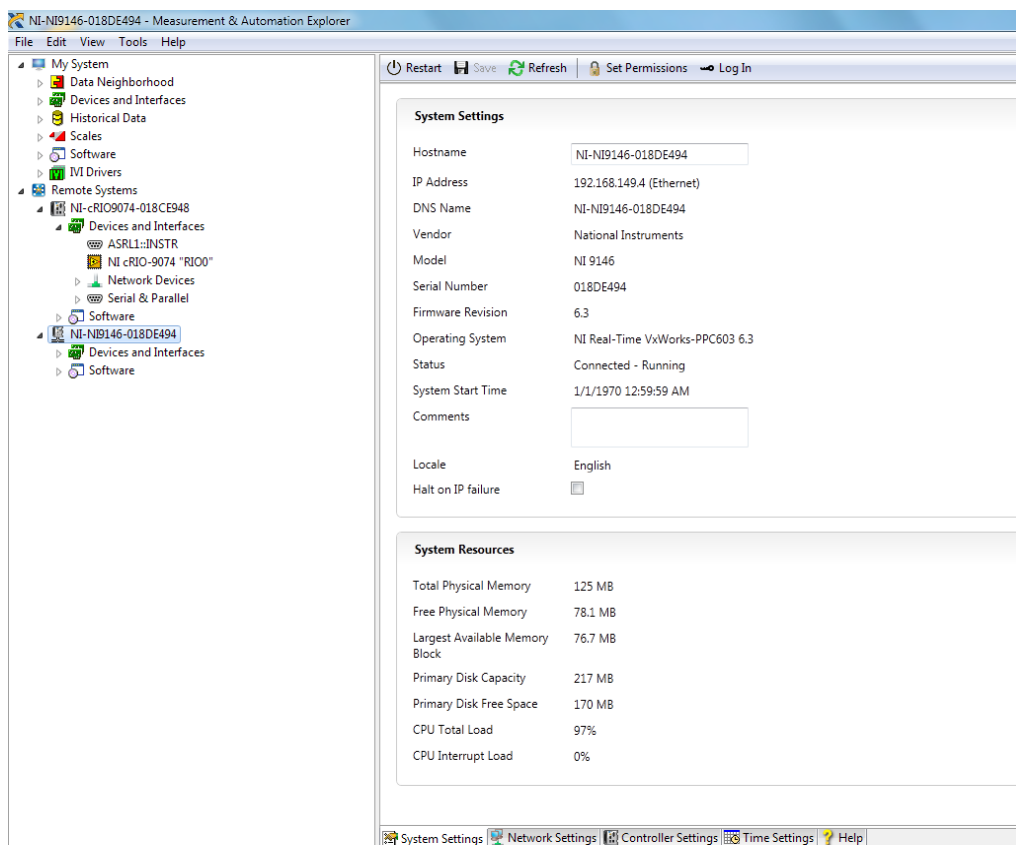


Imagen 3.103. Configuración desde el MAX del NI 9146

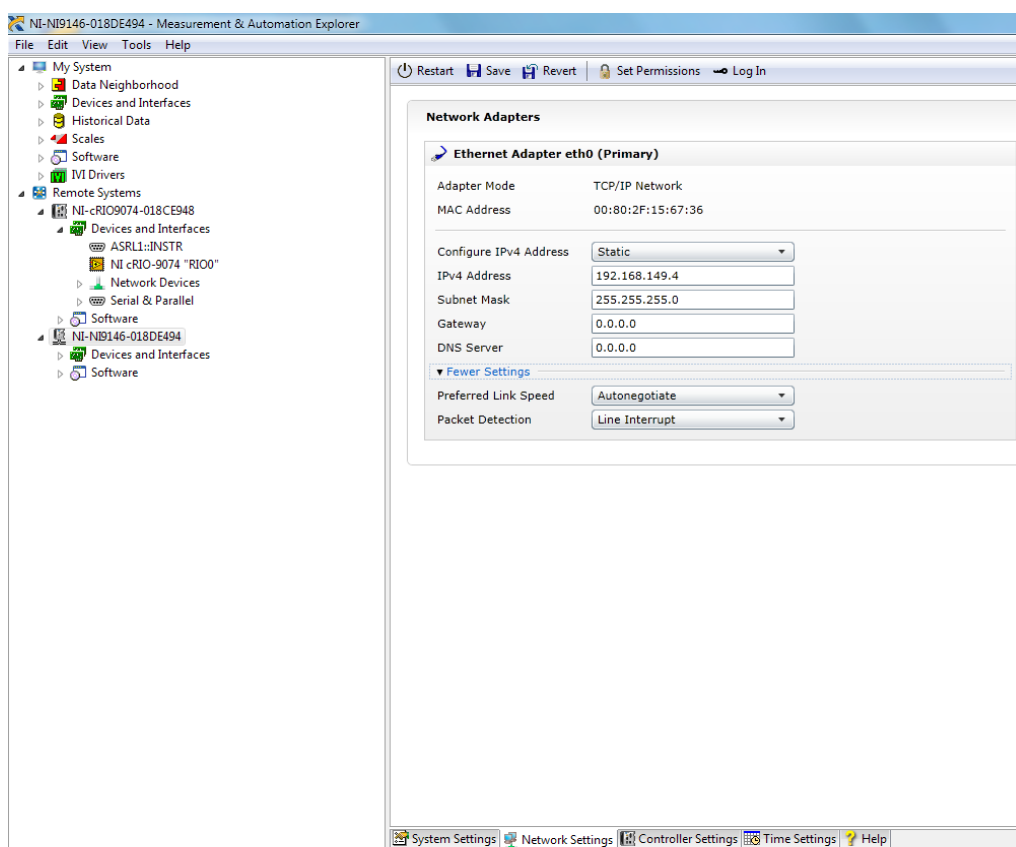


Imagen 3.104. Configuración de la dirección IP del NI 9146

Como se ha mostrado las direcciones IP han quedado fijadas en:

- 192.168.149.8, para el cRIO-9074
- 192.168.149.4, para el NI 9146

Dado que son chasis de expansión de 8 y 4 slots respectivamente, la elección de la dirección dentro de la red de la planta atendía a razones nemotécnicas, dentro de la arbitrariedad del rango de valores posibles.

Hasta aquí sería todo lo necesario para que desde *LabVIEW* se detecten todos los módulos y E/S de la instalación, pero las cosas no siempre son tan fáciles.

La inclusión de la balanza deja un dispositivo heredado con interfaz serie que se ha tenido que configurar aparte dentro del propio código del SCADA, pero que al mismo tiempo y trabajando a ciegas, debe configurarse de igual forma desde el MAX el puerto serie donde se desee conectarla.

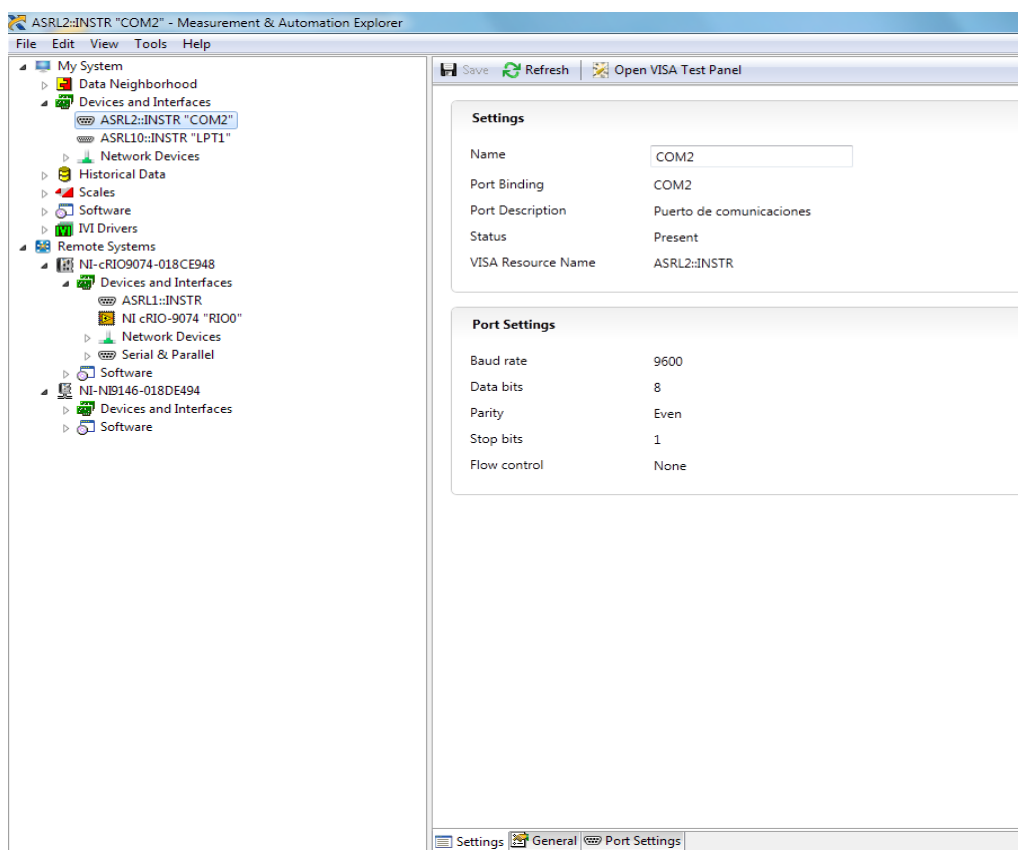


Imagen 3.105. Configuración del puerto serie que utilizará la balanza

Por último sólo resta la instalación de Microsoft Access para el manejo de la base de datos. De este modo, se indicarán a continuación los pasos para dar de alta una base de datos de Access.

1. En primer lugar desde Panel de Control, se selecciona la opción de "Herramientas administrativas".

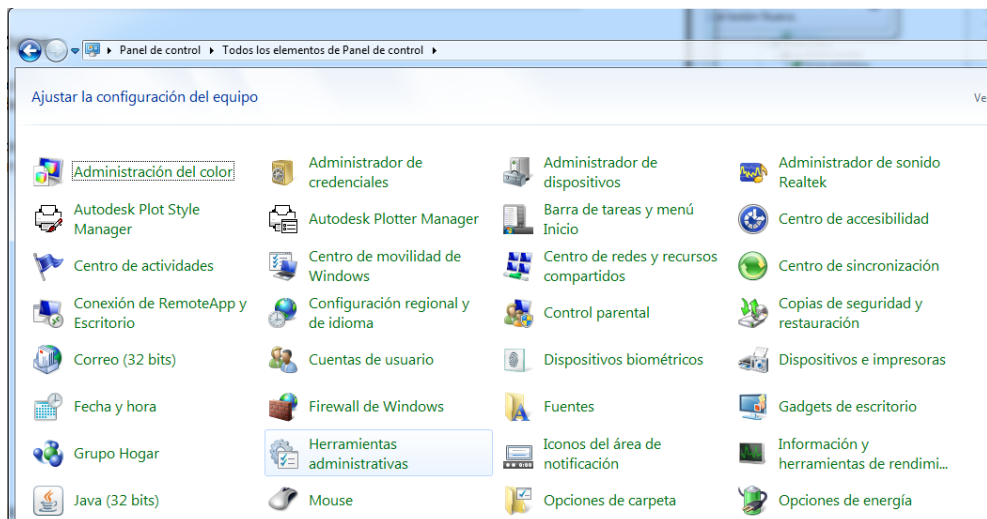


Imagen 3.106. Localización de Herramientas administrativas en Windows 7

2. A continuación se selecciona “Orígenes de datos”.



Imagen 3.107. Orígenes de datos ODBC

3. En la siguiente ventana, desde la pestaña DSN de usuario, se selecciona “Agregar”.

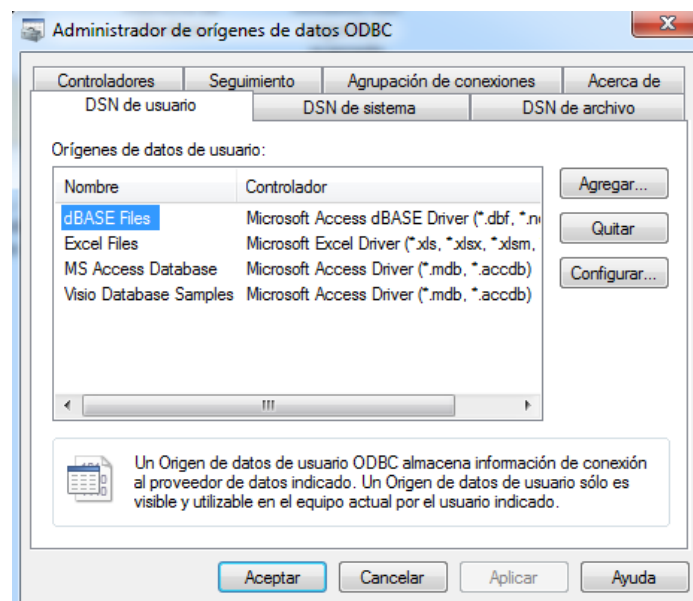


Imagen 3.108. Administrador de orígenes de datos ODBC

- En la ventana de “Crear nuevo origen de datos”, se elige “Microsoft Access Driver (*.mdb)” y se pulsa a “Finalizar”.

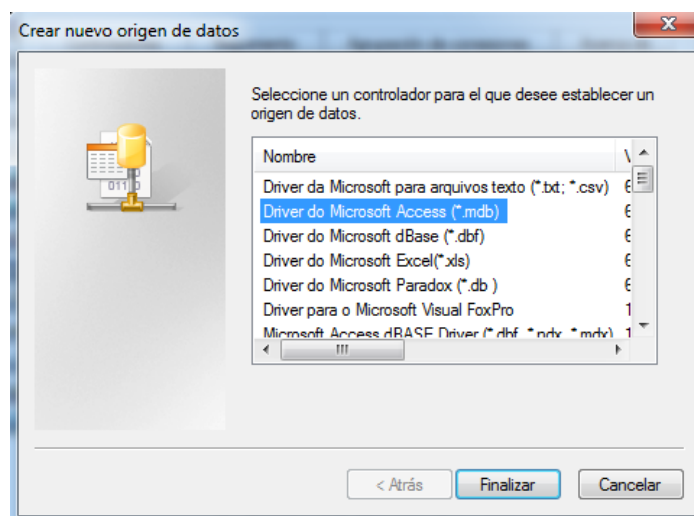


Imagen 3.109. Selección de controlador para crear el nuevo origen de datos

- Posteriormente, cuando aparezca la siguiente ventana, se introducirá un nombre para la base de datos, en este caso “STARK_INDUSTRIES”, y a continuación se pulsa el botón “Crear”.

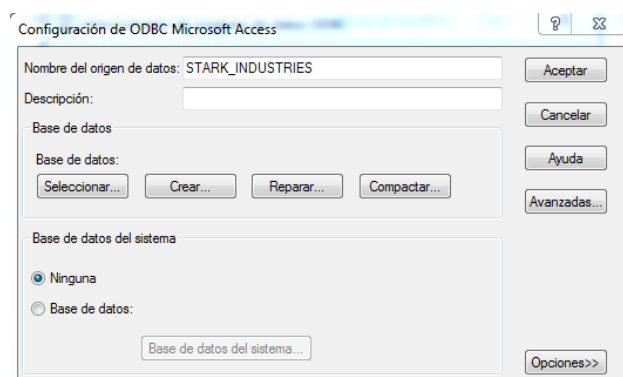


Imagen 3.110. Configuración de ODBC Microsoft Access

- Es necesario de nuevo escribir el nombre de la base de datos y seleccionar la ruta donde se desea emplazar. En el caso considerado C:\.

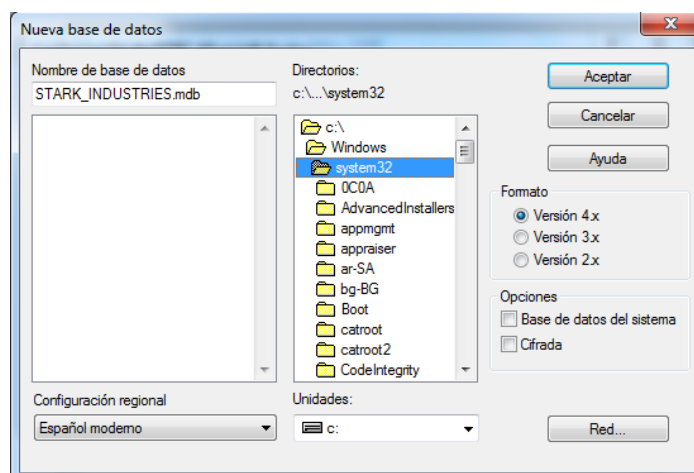


Imagen 3.111. Configuración de la ventana Nueva base de datos

7. Aparecerá un mensaje indicando que la operación de creación se ha completado satisfactoriamente.

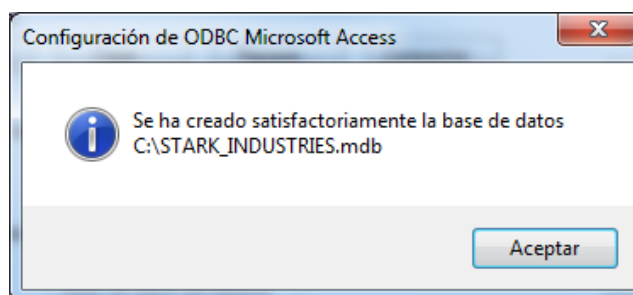


Imagen 3.112. Confirmación de Configuración de ODBC correcta

8. Se habrá creado en el directorio indicado. Ahora se puede proceder a crear un archivo .udl de conexión para la base de datos. Para ello en el mismo directorio C:\, se crea un archivo de texto con el nombre de la base de datos, con la salvedad de que hay que cambiar la extensión de .txt a .udl.

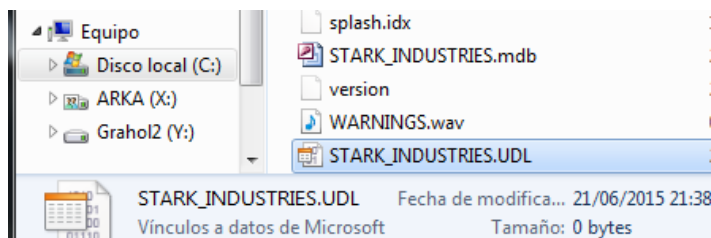


Imagen 3.113. Creación de archivo de conexión .udl

9. Se seleccionan las propiedades del archivo “STARK_INDUSTRIES.udl”. Dentro de la pestaña “Conexión”, y mediante el icono de selección de la parte donde indica “Usar el nombre de origen de datos”, seleccionar la base de datos que se acaba de crear.

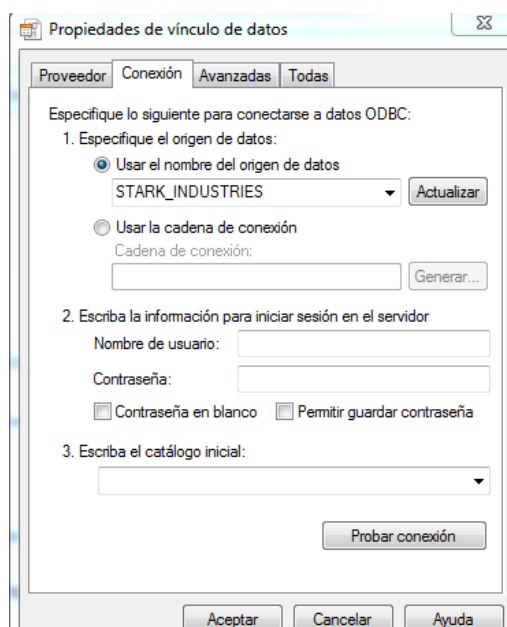


Imagen 3.114. Propiedades de vínculo de datos

10. Por último, sólo resta comprobar que la conexión es correcta, mediante el botón “Probar conexión”.

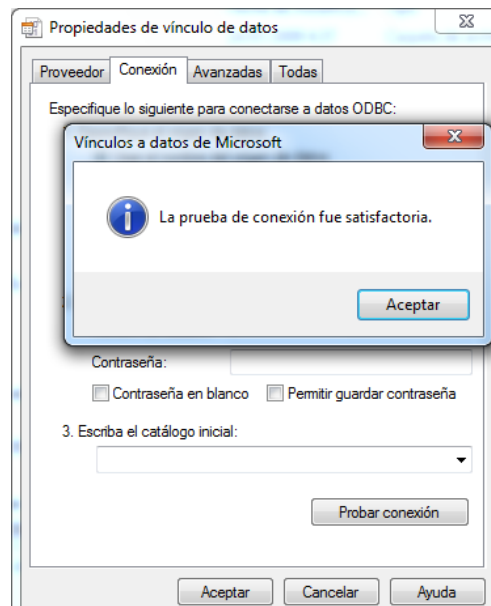


Imagen 3.115. Prueba de conexión con la base de datos

3.3. Especificaciones de diseño de la herramienta SCADA

3.3.1. Especificaciones técnicas

La herramienta SCADA debe ajustarse y cumplir múltiples especificaciones de forma precisa, las cuales con el transcurso de las versiones y el avance paralelo de las investigaciones llevadas a cabo, podrían quedar resumidas en:

- Visualización del estado de los actuadores de la planta (bombas, válvulas, etc.), así como de todo el conjunto de sensores presentes en la misma.
- Posibilidad de modos de operación manual y automático.
- Debe incluir el soporte para la aplicación de técnicas avanzadas de control a través del software *MATLAB*.
- Visualización de alarmas existentes, tanto en un log en tiempo de ejecución, como quedando registrado tanto en la base de datos en la tabla de alarmas, como en un fichero de texto plano.
- Desarrollo con el software *LabVIEW* de *National Instruments*, ya que la Universidad de Almería dispone de una licencia completa y actualizada del mismo. Por otro lado, los equipos PAC empleados son del mismo fabricante, algo que a priori facilitará el desarrollo y evitará incompatibilidades.
- La herramienta debe tener una funcionalidad completa de control y visualización en cualquier PC con sistema operativo *Windows*, sin apenas exigencias hardware.
- Obtención de datos de todas las variables de la planta en crudo, para poder procesar los datos de cada ensayo de forma directa.
- Inclusión de base de datos. Deben quedar almacenados tanto todos los datos de proceso, alarmas o eventos, tales como cambios de consigna o la apertura o cierre de cualquier válvula.
- Representación de histórico de las variables de operación de los lazos de control.

3.3.2. Especificaciones generales de diseño del sistema SCADA

Las especificaciones generales de diseño responden a necesidades derivadas de las especificaciones técnicas anteriormente explicadas, más el añadido de los requisitos propios de un sistema SCADA. De forma general, podemos enumerar:

- Deben existir diferentes pantallas para el control manual y para el funcionamiento automático de la planta, bloqueando en este último modo la posibilidad de intervención por parte del usuario.
- Desarrollo de los componentes que reflejen de forma visual y conceptual los equipos presentes en la instalación y su funcionamiento.
- Necesidad de pantallas de sinóptico general en las cuales se pueda apreciar de forma clara el estado de cada actuador y valor de todas las variables.
- No abusar de los menús, ni complicar innecesariamente los niveles jerárquicos en la arquitectura de software. Sólo se conseguiría hacer la navegación lenta y confusa al cambiar a través de las distintas vistas.
- Desarrollo de diversos perfiles de usuario, con distintos niveles de acceso y vistas del programa. En concreto se han previsto desarrollar tres: Administrador, Operador e Invitado. El primero con control total sobre la planta, el Operador con acceso completo, salvo a valores de configuración concreto y por último, el Invitado, cuyo nivel de acceso lo convierte en un mero espectador del proceso.
- Pantallas de configuración distribuidas y ordenadas de forma que permitan un control total sobre cada conjunto de variables.

3.3.3. Normativa a cumplir

Cuando se aborda el diseño de un interfaz de supervisión surge un variado elenco de normas y guías para llevar a cabo el mismo. Todas ellas poseen un fuerte carácter empírico, cuyas recomendaciones y estándares propician una fácil implementación de nuevas aplicaciones, errores menores del operador debido a diseños robustos y un ahorro de tiempo.

Por otro lado, no se debe olvidar que se tratan de recomendaciones y en ningún caso son leyes de obligado cumplimiento. Es el cliente, quien posee la última palabra en la configuración final de la herramienta SCADA.

3.3.3.1. Norma ISO 9241

La norma UNE-EN ISO 9241, en su sección 10, Principios de diálogo, trata el diseño ergonómico de programas para equipos con Pantallas de Visualización de Datos. Enumera una serie de ideas y recomendaciones que se pretende sirvan de guía a la hora de realizar el planteamiento y desarrollo de las interfaces gráficas, que desarrolla en los capítulos 14, 15, 16 y 17 de dicha norma:

- La aplicación debe estar adaptada a la tarea para la cual se ha diseñado; el diálogo con el usuario debe ser limpio, presentando y exigiendo solamente información estrictamente necesaria.
- La aplicación debe informar del progreso al interlocutor de forma comprensible para éste.
- La aplicación debe poder adaptarse al nivel de capacitación del usuario.
- La aplicación debe ser controlable por el usuario, no al revés.
- Las respuestas de la interfaz deben ser coherentes y adaptadas al nivel de capacitación del usuario.

- La aplicación debería ser tolerante a fallos y con herramientas de corrección automáticas.
- Debería ser clara y sencilla de utilizar.

Lo que persigue la normalización es obtener unas aplicaciones con una interfaz gráfica fácil de utilizar.

Teniendo en cuenta lo anterior, se cuenta con una serie de directrices que serán de utilidad a la hora de diseñar aplicaciones de visualización. Los principios básicos de diseño se resumen a continuación:

- Diseño simple, orden lógico y bien etiquetado.
- No mostrar datos irrelevantes o innecesarios de forma automática.
- Las indicaciones cuantitativas, mejor de forma gráfica.
- Unidades estandarizadas.
- Si es posible, un solo tipo de fuente.
- Los estados binarios, mejor de forma gráfica.
- Definir unas líneas imaginarias en pantalla sobre las cuales se colocarán los elementos.
- Enmarcar los objetos relacionados para un mejor contraste.
- Notificar siempre los resultados de cualquier acción de forma clara.
- Utilizar los colores con medida y de forma práctica, no artística.
- Los colores deben ser complemento informativo. Combinarlos con etiquetas o posiciones.

Otras ideas clave más específicas de diseño que se recomiendan seguir son:

- Los colores de fondo deben rellenarse con colores neutros para no forzar la vista con contrastes excesivos. Es aconsejable que todas las pantallas de una misma categoría tengan el mismo color de fondo. Ciertas combinaciones de tonos de muy alto contraste pueden convertir la aplicación en ilegible. Los colores extremos del espectro (rojo y azul) no deben aparecer simultáneamente pues provocan esfuerzos excesivos en los ojos. No hay que utilizar más colores de los necesarios.
- Es aconsejable mantener el sinóptico de pantalla lo más simple posible, con la información indispensable a la vista.
- Los elementos importantes, tales como alarmas o estados operativos, deben gozar de posiciones privilegiadas en pantalla, en los márgenes superior o inferior preferentemente. La información extra debe aparecer sólo si se requiere.
- Hay que utilizar siempre formas claras de volver atrás, utilizando un botón con la misma ubicación en todas las pantallas.
- Agrupar elementos facilita la relación entre ellos.
- Uno de los requerimientos en la Directiva 90/270/CEE para la Pantalla cita textualmente:

"Los caracteres de pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma clara y tener una lectura cómoda y los colores de fondo deben proporcionar el contraste adecuado para una visualización clara y fácil. Se recomienda utilizar fuentes del tipo *Sans Serif*, más escuetas y con mejor separación entre las letras" (4).

3.3.3.2. Directiva 98/37/CE

Esta directiva determina una serie de medidas a tener en cuenta a la hora de realizar cualquier diseño de maquinaria.

Las normas pretenden ofrecer unas especificaciones técnicas que permitan diseñar y fabricar productos conformes con la Directiva. Son de aplicación voluntaria, pero se da por asumido que las normas nacionales de los países miembros ya cubren los requisitos básicos definidos en dichas normas. La tarea de normalización en Europa corresponde a los dos organismos de normalización existentes: CEN (Comité Europeo de Normalización) y CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

En el Anexo I de esta Directiva, Requisitos esenciales de seguridad y de salud relativos al diseño y fabricación de las máquinas y de los componentes de seguridad, se enumeran una serie de principios de diseño que se engloban bajo la idea siguiente: "Los sistemas de mando deben diseñarse y fabricarse para que resulten seguros y fiables, a fin de evitar cualquier situación peligrosa".

- Serán claramente visibles e identificables.
- Estarán colocados de manera que se pueda maniobrar con seguridad, sin pérdida de tiempo.
- Se diseñarán de tal manera que el movimiento del órgano de accionamiento sea coherente con el efecto ordenado.
- Estarán situados de forma que su maniobra no acarree riesgos adicionales (4).

3.3.3.3. Norma ISO 11064

El estándar ISO 11064 establece unos principios, recomendaciones y requerimientos para ser aplicados en el diseño de centros de control. Este estándar propone aspectos de propósito general y en el caso particular de aplicación en sala de control industrial, la ergonomía aparece prioritariamente en forma de ergonomía física (55).

3.3.3.4. ISA 101

Un reflejo del esfuerzo que se realiza por estandarizar los procedimientos de diseño es el ISA 101 (*Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*). Con este, se pretende tener un estándar que proporcione una dirección en el diseño, implementación y mantenimiento de las interfaces HMI. Su uso debería:

- Proveer una guía para diseñar, construir, operar y mantener interfaces HMI que resulten más seguras, más efectivas y más eficaces en el control de procesos, tanto en situaciones normales como anormales.
- Mejorar las habilidades del usuario para detectar, diagnosticar y responder ante situaciones anormales.

Sus objetivos principales son disminuir la tasa de errores de los operadores, reducir los tiempos de aprendizaje y reducir costes de rediseño al estandarizar los procedimientos.

Las prácticas de este estándar son aplicables a cualquier tipo de proceso que use una interfaz HMI para interactuar con un sistema controlado (56).

3.3.3.5. RD 488/1997

El Real Decreto 488/1997, de 14 de Abril, establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. En el artículo 2, se definen los términos "Pantalla de visualización", "Puesto de trabajo" y "Trabajador". Se

describen en artículos posteriores las obligaciones del empresario en materia general, en materia de vigilancia de la salud y en materia de información y formación.

Este Real Decreto, encomienda de manera específica la elaboración y el mantenimiento actualizado de una Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización. Esta, proporciona criterios y recomendaciones que pueden facilitar a los empresarios y a los responsables de prevención la interpretación y aplicación del citado Real Decreto, especialmente en lo que se refiere a la evaluación de los riesgos para la salud de los trabajadores involucrados y en lo referente a las medidas preventivas aplicables (57).

3.3.3.6. Norma ISA S5

El propósito de esta norma es establecer un medio uniforme de designación de los instrumentos y los sistemas de la instrumentación usados para la medición y control. Con este fin, el sistema de designación incluye los símbolos y presenta un código de identificación (58).

En este punto se debe aclarar que aunque el esquema sinóptico en un principio se pensó desarrollar siguiendo las pautas designadas en esta norma, por deseo expreso de los operadores y usuarios finales de la herramienta SCADA se modificaron los elementos gráficos y etiquetas, por otros más descriptivo gráficamente y que no seguían esta norma.

3.3.3.7. Norma UNE 1063

Esta norma sirve para la caracterización de las materias que circulan por tuberías no puestas a tierra. Esta caracterización se realiza por medio de colores en los dibujos e instalaciones industriales con arreglo a los siguientes puntos: La naturaleza de la materia transportada se caracterizará por un color básico, completado con texto indicado el fluido sobre dicho color. El peligro derivado de la naturaleza o estado de la materia transportada se señalará también por un signo convencional (59).

Las tuberías deben identificarse inequívocamente por placas que describan la materia de paso, si se emplea una caracterización recurriendo a los colores, deberá entre otras: Emplearse placas o etiquetas adhesivas del color de los grupos según la siguiente tabla o colocarse etiquetas perimetrales de color según el color de los grupos, o colocarse placas, etiquetas adhesivas por ejemplo al comienzo, al final, en los puntos de ramificaciones, pasos a través de paredes, accesorios, etc.

En lo que se refiere al marcado de sentido de circulación esta norma es similar a la alemana DIN 2403, de la cual copia y actualiza su nomenclatura y valores.

3.3.3.8. GEDIS

La guía ergonómica de diseño de interfaz de supervisión GEDIS ofrece un método de diseño especializado en sistemas de control y supervisión industrial basado en niveles, donde se van concretando los diseños de los distintos tipos de pantallas y contenidos. La guía GEDIS puede convertirse en complemento para aquellos ingenieros técnicos que desarrollan interfaces de supervisión mediante los sistemas SCADA. La guía se estructura en dos partes. Una primera, detalla un conjunto de indicadores seleccionados de las pautas de diseño de interfaces multimedia que utilizan los ingenieros y expertos en interacción persona-ordenador. La segunda parte muestra la obtención de medidas cuantitativas de evaluación de los indicadores anteriores de manera que se obtiene un valor numérico que permite al usuario y al diseñador posibles mejoras y una comparación directa con otras interfaces (55). La guía GEDIS intenta llenar un vacío metodológico que aúna los esfuerzos de la ingeniería de sistemas y la ergonomía para la mejora de la eficacia de los sistemas persona-máquina en salas de control industrial.

Materia de paso	Grupo	Color	Signo color según UNE 48103	Muestra color según RAL 840HR
Agua	1	Verde	S 2070-G20Y	RAL 6018
Vapor de agua	2	Rojo	S 1580-Y90R	RAL 3000
Aire	3	Gris	S 4005-R80B	RAL 7001
Gases combustibles	4	Amarillo ó Amarillo con color adicional rojo	S 1080-Y ó S 1080- Y S 1580-Y90R	RAL 1021 / RAL 3000
Gases no combustibles	5	Negro ó Amarillo con color adicional negro	S 9000-N ó S 1080- Y S 9000-N	RAL 1021 / RAL 9004
Ácidos	6	Naranja	S 0580-Y70R	RAL 2004
Lejías	7	Violeta	S 4030-R50B	RAL 4001
Líquidos combustibles	8	Marrón ó Amarillo con color adicional rojo	S 4040-Y30R ó S 4040-Y30R S1580- Y90R	RAL 8001 / RAL 3000
Líquidos no combustibles	9	Negro ó Amarillo con color adicional negro	S 9000-N ó S 4040- Y30R S 9000-N	RAL 9004 / RAL 8001
Oxígeno	0	Azul	S 2060-R90B	RAL 5015
Contra incendio (apartado 6.3)		Rojo borde blanco	S 1580-Y90R S0500-N	RAL 3000 / RAL 9003
Peligro (apartado 6.2)		Naranja borde negro	S 0580-Y70R S 9000-N	RAL-2004 / RAL 8022

Tabla 3.7. Tabla de colores según material transportado por las tuberías (59)

A pesar de haber tenido en cuenta las indicaciones dispuestas en los documentos anteriormente enumerados, es la guía GEDIS el apoyo fundamental para el desarrollo de la herramienta SCADA y a cuya evaluación se someterá en el capítulo 4 de resultados, siguiendo los criterios descritos en las siguientes tablas.

ELEMENTO	RANGO NUMÉRICO Y CUALITATIVO (A=ADECUADO, M=MEDIO, NA= NO ADECUADO)
<u>1. Arquitectura</u>	
1.1. Correspondencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
1.2. Número de capas jerárquicas	[Nº<4, Nº>4] => [5,0]
<u>2. Distribución</u>	
2.1. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
2.2. Densidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
2.3. Simetría y balance	[A,M, NA] =>[5,3,0]
2.4. Flujo de proceso	[CLARO,MED, NO CLARO] =>[5,3,0]
<u>3. Navegación</u>	
3.1. Correspondencia con arquitectura	[A,M, NA] =>[5,3,0]
3.2. Accesibilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
3.3. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]

Tabla 3.8. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS

ELEMENTO	RANGO NUMÉRICO Y CUALITATIVO (A=ADECUADO, M=MEDIO, NA= NO ADECUADO)
<u>4. Uso del color</u>	
4.1. Visibilidad	
4.2. Contraste con el fondo	[A,M, NA] =>[5,3,0]
4.3. Número de colores	[4<c<7, c>7] => [5,0]
4.4. Diferenciabilidad entre colores	
4.5. Uso de los colores típicos (R,G,B)	[SI, NO]=>[5,0]
4.6. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>5. Información textual</u>	
5.1. Número de fuentes	[f<4,f>4] => [5,0]
5.2. Ausencia tamaños pequeños (<8)	[SI, NO]=>[5,0]
5.3. Visibilidad del texto	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.4. Espaciamiento	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.5. Alineación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.6. Uso del énfasis	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.7. Uso de acrónimos	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.8. Coloración del texto	[A,M, NA] =>[5,3,0]
5.9. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>6. Símbolos y representaciones de los equipos</u>	
6.1. Facilidad de reconocimiento	[A,M, NA] =>[5,3,0]
6.2. Visibilidad del estado del equipo	[SI, NO]=>[5,0]
6.3. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>7. Valores de proceso</u>	
7.1. Visibilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.2. Ubicación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.3. Distribución	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.4. Agrupación de datos	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.5. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>7. Valores de proceso</u>	
7.1. Visibilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.2. Ubicación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.3. Distribución	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.4. Agrupación de datos	[A,M, NA] =>[5,3,0]
7.5. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>8. Tablas y grupos de tendencia</u>	
8.1. Formato	[A,M, NA] =>[5,3,0]
8.2. Visibilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
8.3. Ubicación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
8.4. Agrupación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
8.5. Flexibilidad de configuración de tendencias	[A,M, NA] =>[5,3,0]
8.6. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]

Tabla 3.9. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS (Continuación I)

ELEMENTO	RANGO NUMÉRICO Y CUALITATIVO (A=ADECUADO, M=MEDIO, NA= NO ADECUADO)
<u>9. Comandos e ingreso de datos</u>	
9.1. Visibilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
9.2. Maniobrabilidad	[A,M, NA] =>[5,3,0]
9.3. Retroalimentación	[A,M, NA] =>[5,3,0]
9.4. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
<u>10. Alarmas</u>	
10.1. Visibilidad de la ventana de alarmas	[A,M, NA] =>[5,3,0]
10.2. Accesibilidad de la ventana de alarmas	[A,M, NA] =>[5,3,0]
10.3. Ubicación de la ventana de alarmas	[A,M, NA] =>[5,3,0]
10.4. Información de los textos	[A,M, NA] =>[5,3,0]
10.5. Visibilidad de alarmas en sinópticos	[A,M, NA] =>[5,3,0]
10.6. Facilidad de reconocimiento de la situación	[SI, NO]=>[5,0]
10.7. Consistencia	[A,M, NA] =>[5,3,0]
Evaluación Global	

Tabla 3.10. Criterios de evaluación de un sistema SCADA de la guía GEDIS (Continuación II)

3.4. Diseño del sistema SCADA

A lo largo de esta sección se describirá de forma pormenorizada el diseño de la herramienta SCADA. Se partirá desde una breve introducción general que sitúe el contexto, tras la cual se explicarán las herramientas empleadas en su desarrollo. Una vez concluidos los apartados anteriores se abordará el diseño particular de la interfaz SCADA.

3.4.1. Arquitectura general de funcionamiento de un sistema SCADA

La automatización de sistemas ha pasado a formar parte del ámbito corporativo y se engloba dentro del paquete empresaria con la finalidad de optimizar la productividad y mejorar la calidad. El esquema que representa los flujos de información dentro de la empresa y cómo se realiza la integración a todos los niveles de la misma, posee gran similitud a la ya mostrada pirámide de la automatización CIM.

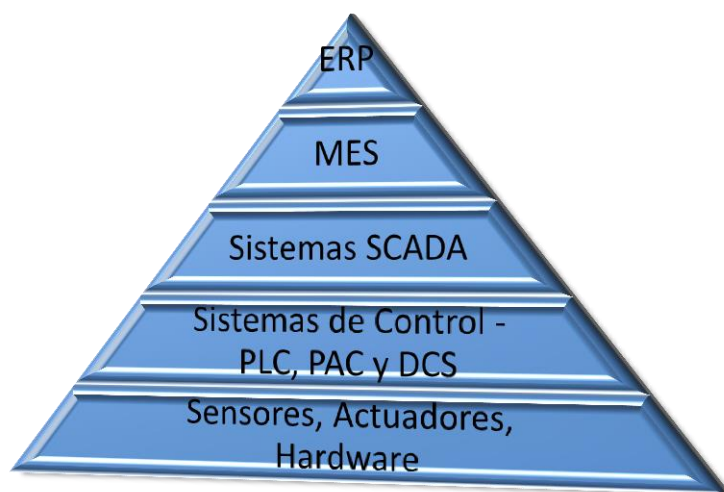


Imagen 3.116. Pirámide de la automatización (5)

La estructura corporativa se puede dividir de forma general en tres niveles:

- ERP (*Enterprise Resource Planning*): La Planificación de Recursos Empresariales engloba la parte de gestión: finanzas, compras, ventas y logística de la empresa.
- MES (*Manufacturing Execution System*): La Gestión de Producción abarca la gestión de calidad, documentación, gestión de producción, mantenimiento y control de procesos.
- CONTROL: Englobaría toda la parte de automatización y control de procesos

Los sistemas SCADA se han venido empleando como nexo entre el nivel de CONTROL y el nivel MES. La tendencia actual de los mismos tiende hacia la integración con los sistemas MES y se extiende a la compatibilidad con software de gestión de la producción, de control de calidad y de gestión empresarial en su sentido más extenso. A esto debemos añadir que la integración de aplicaciones permite desarrollar estrategias de supervisión específicas para un proceso concreto, basadas en la aplicación de diferentes tecnologías a partir de un SCADA comercial (4).

3.4.1.1. Estructura interna de una herramienta SCADA comercial

La estructura básica de una aplicación SCADA se puede representar mediante el esquema siguiente:

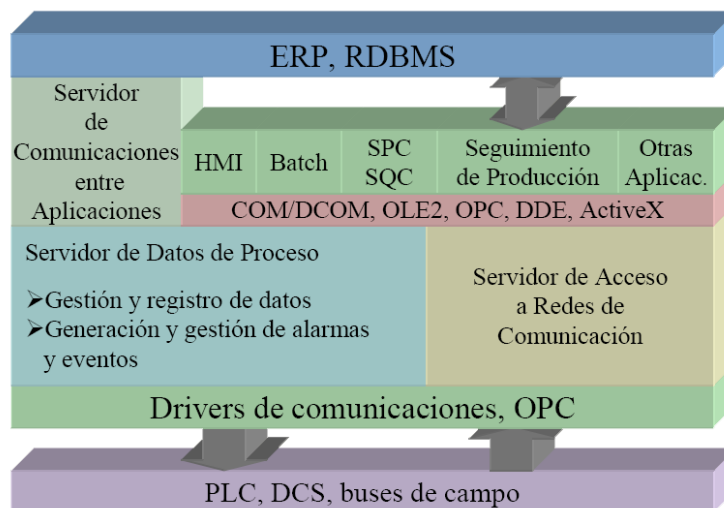


Imagen 3.117. Estructura interna de un sistema SCADA (I) (58)

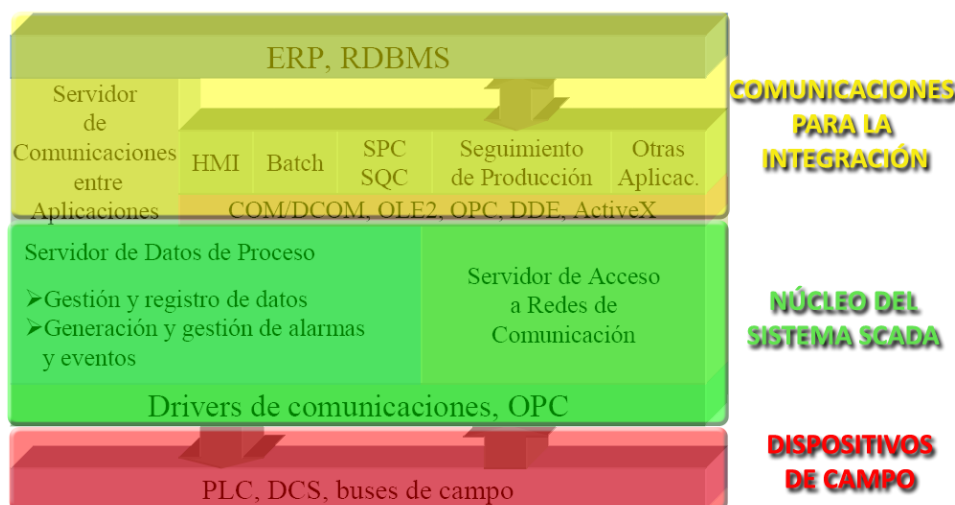


Imagen 3.118. Estructura interna de un sistema SCADA (II) (58)

En la parte inferior se encuentran los dispositivos de campo que proporcionan los datos del proceso y reciben las consignas y señales de mando para su control. La parte central constituye el núcleo de la aplicación SCADA y está constituido por diversos servidores. En líneas generales se puede hablar de los núcleos siguientes:

- *Driver* de comunicación: Encargado de gestionar las comunicaciones entre los servidores de datos y los dispositivos de campo e implementa los protocolos necesarios para efectuar dichas comunicaciones.
- Servidor de Datos del Proceso: Detecta y gestiona eventos y alarmas, además de almacenar los datos para su análisis posterior. Tiene acceso directo a la base de datos.
- Servidor *Web*: Gestiona la disponibilidad y el acceso a datos mediante internet. Permite recibir, desde equipos remotos, información de la planta.
- HMI: interfaz gráfica para la visualización del estado del proceso mediante objetos animados, textos, ventanas múltiples, etc.
- OLE/ODBC: Interfaz según estándar de *Microsoft* para la comunicación de datos entre los distintos tipos de bases de datos. Es útil cuando se desea enlazar la base de datos del SCADA con la base de datos del sistema de gestión de la empresa tipo ERP (60).

Aunque nuestra instalación dista mucho de ser una planta industrial típica, excepto la capacidad de publicación *Web*, el resto de núcleos están presentes en la herramienta SCADA diseñada. Aunque la aplicación está preparada para ello, por motivos de seguridad todas las variables son sólo accesibles desde la red local privada de la Universidad de Almería. Como se detallará más adelante, es una de las propuestas de mejora para el software SCADA.

3.4.2. Herramientas de desarrollo del sistema SCADA

En este apartado se describirá principalmente el software de desarrollo del interfaz, que en este caso se trata del programa *LabVIEW* de NI. Gracias a que el PAC cRIO-9074 pertenece al mismo fabricante, se evita tener que emplear el servidor OPC de NI de forma manual para tener que registrar las variables de los módulos, pues existe la posibilidad de configuración automática. Sin embargo, el primer epígrafe de esta sección está dedicado a la tecnología OPC por necesidad de contextualización.

3.4.2.1. OPC (*Ole for Process Control*)

En un sistema de automatización existen multitud de elementos de control y monitorización, cada una de ellas con su protocolo de comunicaciones específico y con un sistema operativo propio. Cada fabricante proporciona este programa controlador de comunicaciones o *driver* que comunica su producto con un equipo determinado.

OPC, en resumen, es una tecnología diseñada para comunicar aplicaciones. Es un estándar para la interconexión de sistemas basados en el SO *Windows* y hardware de control de procesos. Es un estándar abierto que permite un método fiable para acceder a los datos desde aparatos de campo. El método de acceso es el mismo sin depender del tipo y origen de los datos.

OPC se ha definido a partir de la tecnología de incrustación de datos de Microsoft OLE/COM:

- OLE (*Object Link Embedded*) permite el acceso a los datos de equipos interconectados mediante LAN o WAN.
- COM (*Component Object Model*) permite definir cualquier elemento de campo mediante sus propiedades bajo el aspecto de una interfaz.

Los componentes OPC se pueden clasificar en dos categorías diferenciadas:

- *OPC Client*: es una aplicación que sólo utiliza datos. Un cliente se relaciona con un servidor de una forma bien definida. Cualquier cliente OPC puede comunicarse con cualquier servidor OPC.
- *OPC Server*: permite el acceso a elementos de un sistema automatizado desde otras aplicaciones (clientes OPC).

OPC nació bajo la idea de suprimir este problema, creando un estándar orientado al modo de intercambio de datos, independientemente de la tecnología utilizada para hacerlo. Cualquiera que sea la fuente de los datos, el formato de presentación y acceso a los datos será fijo. De esta manera permitirá intercambiar datos con cualquier equipo que cumpla el estándar OPC.

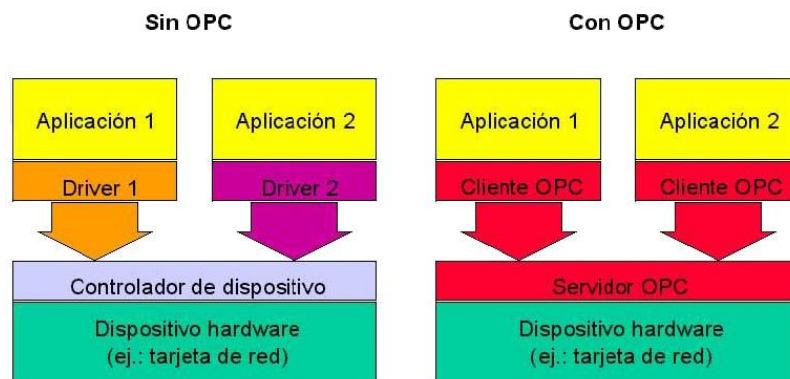


Imagen 3.119. Comparación entre un sistema con OPC y sin OPC (58)

Los motivos que propiciaron la aparición de OPC fueron principalmente:

- Duplicación de esfuerzos. Todos los programas necesitan un driver para un hardware concreto.
- Falta de consistencia entre *drivers*. Hay funcionalidades y características hardware que no son soportadas por todos los *drivers*.
- Formato de datos inconsistente. Se le daba más importancia al formato de los datos que a los datos en sí.
- Cambios en el hardware, provocan que los drivers queden obsoletos.
- Conflictos de acceso. Generalmente, dos programas no pueden acceder simultáneamente al mismo dispositivo debido a que poseen drivers independientes (58).

Las especificaciones de la norma que se ha adoptado en este proyecto ha sido el OPC-DA. Proporciona el acceso en tiempo real a los datos de manera consistente. Acceso que se realiza en forma de valores simples denominados puntos. Cada uno de estos puntos consiste en tres valores: valor del punto, calidad del punto y fecha del punto (4). Con OPC-DA los datos son accedidos siempre de la misma manera por todas las aplicaciones. Esto asegura que se puede ampliar sin problemas el sistema con el paso del tiempo según necesidad.

Por todo esto, las ventajas del uso de la tecnología OPC serían:

- Los fabricantes de hardware tienen que desarrollar solamente un conjunto de componentes de software para que los clientes lo utilicen en sus aplicaciones.
- Los desarrolladores de software no tienen que reescribir drivers debido a cambios en características o adiciones en un hardware.
- Los clientes tendrán más opciones con las cuales puedan desarrollar diversos sistemas de aplicación de nivel industrial (58).

3.4.2.2. LabVIEW

La herramienta empleada para el diseño completo de nuestro interfaz SCADA fue la distribución 2012 de *LabVIEW*. Este software debe instalarse siguiendo unos pasos determinados en el computador de desarrollo para asegurarnos que la configuración de los chasis cRIO-9074 y el NI 9146 se encuentran correctamente instalados:

1. Se lanza el programa MAX (*Measurement & Automation Explorer*) que ya se ha descrito con anterioridad.
2. Se selecciona dentro del menú de *Configuration* del controlador, *Remote Systems*. Deben aparecer los equipos conectados al sistema, identificados por su número de serie y modelo.

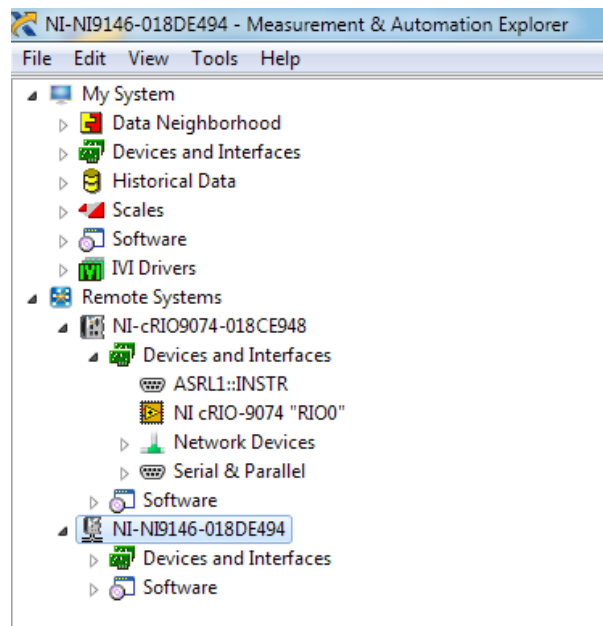


Imagen 3.120. Detección en el MAX de los chasis cRIO-9074 y NI 9146

3. Para realizar una instalación segura, asegurando que se parte de cero. Se recomienda realizar un formateo desde el mismo menú *Remote System>Configuration>Format Disk*. Para poder realizar dicha operación en el cRIO-9074, previamente se debe configurar el controlador en *Safe Mode*, para ello se debe emplear el *switch* de configuración colocándolo en la posición ON, cuando termine el formateo se colocará nuevamente en OFF.

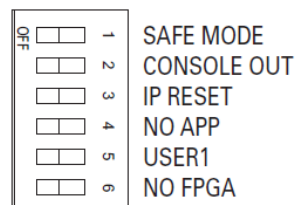


Imagen 3.121. Detalle del *switch* de configuración del cRIO-9074

4. Una vez completado el formateo y reiniciado el equipo es el momento de asignar una dirección IP empleando el menú *Use the following IP address* como se vio en la sección 3.1 y se reinicia nuevamente.
5. Ahora deberían aparecer los chasis con las nuevas direcciones IP. Sólo resta instalar el software necesario, usando para ello la opción *Add/Remove Software*. Llegado a este

punto, se instalaran los controladores de los chasis, el módulo de drivers VISA para la lectura del puerto serie y el más importante el *NI Scan Engine*. Gracias a este controlador, como se verá a continuación, *LabVIEW* podrá hacer el registro de forma automática de todas las variables de los módulos conectados, sin necesidad de configurar un servidor OPC.

Este lenguaje de programación cuenta con innumerables módulos para extender sus funcionalidades básicas, concretamente han sido necesarios:

- *Database Connectivity Toolkit*: Gracias a esta herramienta se ha podido trabajar con la base de datos creada en Access. Además al tratarse de un estándar abierto desarrollado por *Microsoft* se mantiene independiente el acceso a la base de datos por parte del sistema operativo del lenguaje de programación empleado.
- *Datalogging and Supervisory Control*: Módulo que porta las principales funciones del sistema SCADA en lo que respecta al manejo de los datos de las variables de los módulos de adquisición.
- *Real-Time*: Este módulo es el responsable de la temporización y manejo de los relojes internos del sistema de forma transparente al programador.
- *C Series Module Support*: En conjunto con el *NI Scan Engine* hacen posible el trabajar en modo *Scan Interface*.
- *FPGA*: Posibilita la programación a bajo nivel de los chasis de NI. Aunque no se haya empleado en el desarrollo de este proyecto, se ha instalado de cara a trabajos futuros.

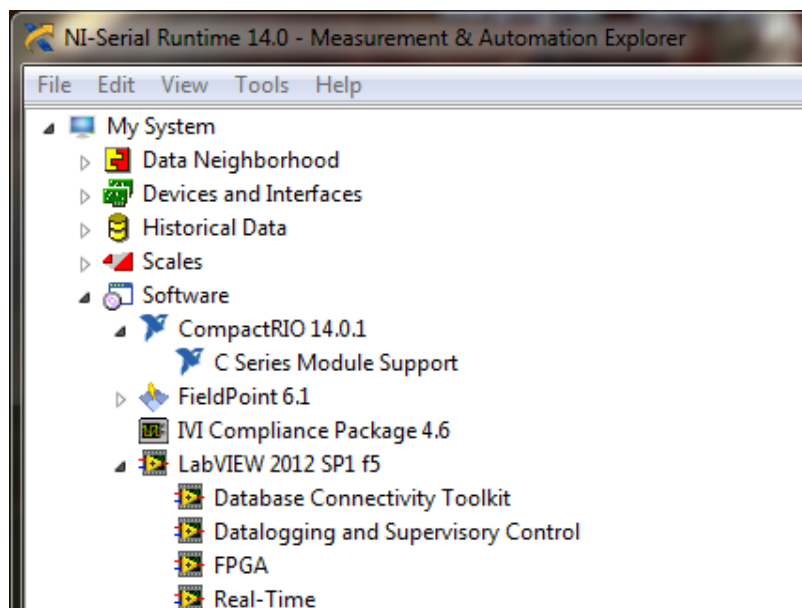


Imagen 3.122. Módulos software instalados

Tras el proceso de instalación/configuración anterior, *LabVIEW* posee dos modos de programación para los proyectos y VIs: *Scan Interface Mode* o *FPGA Mode*.

La principal diferencia es al nivel que bajamos en el sistema para emplazar el programa desarrollado.

Cuando se trabaja en modo FPGA se debe desarrollar un interfaz propio con un conjunto de instrucciones reducidas, las cuales sean soportadas por el PAC cRIO-9074. Gracias a la ejecución a tan bajo nivel y desde el sistema operativo de tiempo real embebido se pueden alcanzar velocidades de operación del orden de los megahercios.

En el modo *Scan Interface*, gracias al *NI Scan Engine*, las variables son publicadas en una tabla de memoria de entrada y salida y desde ahí son leídas y actualizadas de forma periódica. La diferencia principal tiene que ver con el tiempo de ejecución que en este caso no recomiendan emplearlo para aplicaciones con tiempos inferiores a 1 milisegundo. Como ventaja principal es el amplio abanico de librerías disponibles para este modo de programación, donde parte de la ejecución del interfaz descansa sobre el computador del SCADA (61).

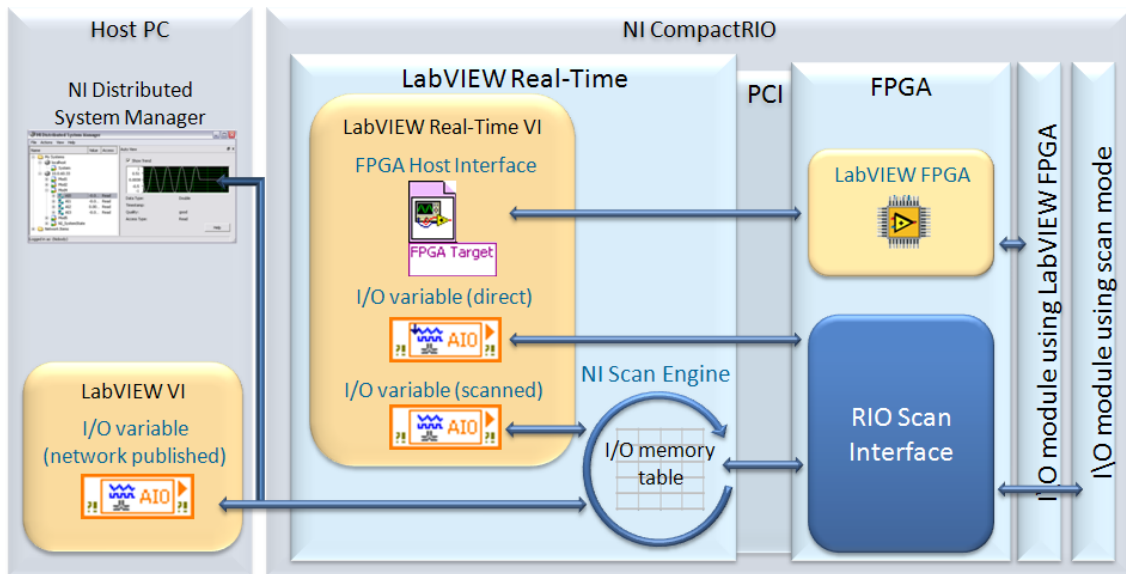


Imagen 3.123. Esquema de funcionamiento del Scan Interface y FPGA (61)

Gracias al empleo del modo *Scan Interface* se pueden emplear directamente los módulos de NI de la serie C directamente en el entorno de *LabVIEW Real-Time*. Para ello se deben seguir los siguientes pasos:

- Tras arrancar *LabVIEW*, se selecciona *Empty Project*.
- En la venta de un nuevo proyecto *Project Explorer* se despliega el menú de propiedades y se selecciona *New>Target and Devices*.
- Dentro de ese menú, y asegurándose que se ha marcado la casilla *Existing target or device*, se pulsa en el botón *Add Targets and Devices*.
- Se despliega el menú de *Real-Time CompactRIO*.
- Se selecciona el controlador del *CompactRIO* y se pulsa aceptar.
- Ahora toca seleccionar el modo de programación en el siguiente cuadro de diálogo que aparecerá *Select Programming Mode*. Aquí es donde se elige *Scan Interface*, para activar el sistema en el modo *Scan Interface*.
- Se pulsa en continuar y *LabVIEW* automáticamente añadirá los controladores del chasis y de los módulos de adquisición al proyecto.
- Ahora sólo resta que el proyecto detecte los módulos instalados, para ello se emplea el botón *Discover* en el menú contextual *Discover C Series Modules?*, y como se verá en la siguiente imagen, se detectaran todos los módulos de cada tipo instalados.
- Sólo resta grabar el proyecto desde *File>Save Project* como *CONTROL SolarSPRINGv3.lvproj*.

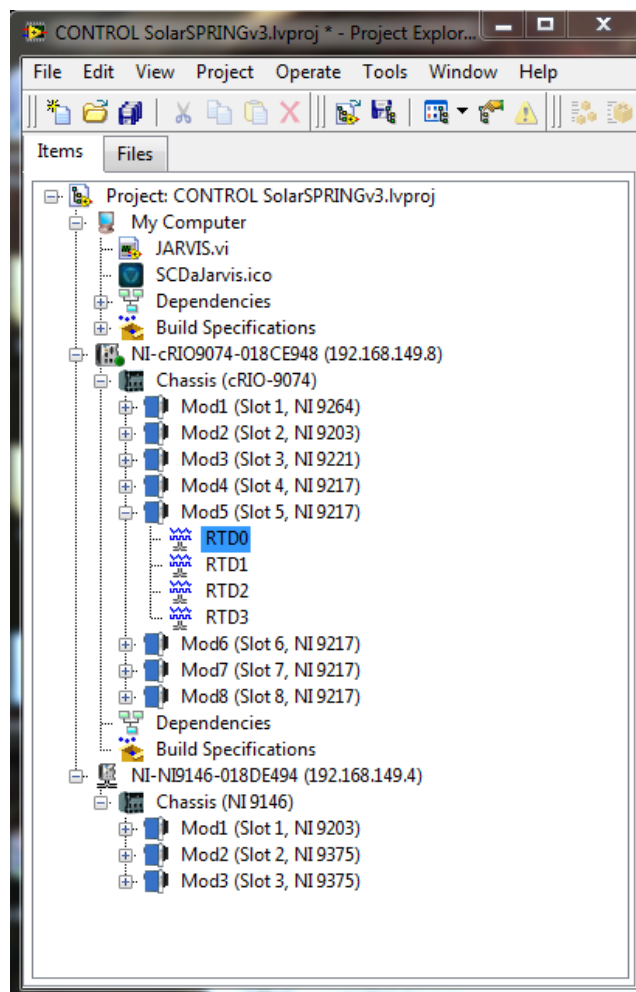


Imagen 3.124. Detección de los chasis y todos los módulos instalados en ellos

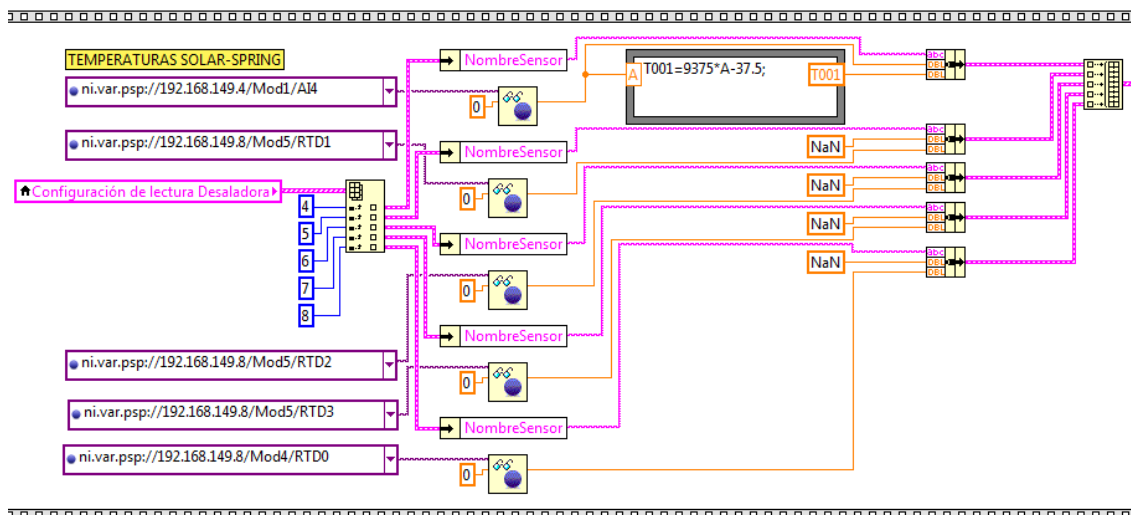


Imagen 3.125. Ejemplo de empleo de las variables publicadas en modo Scan Interface

Con todo lo detallado hasta ahora, se ha conseguido configurar de forma completa el hardware y software de NI. Ya sólo nos resta comenzar a completar el código de programa SCADA. Gracias a lo intuitivo del modo de programación gráfico, *LabVIEW* está muy extendido y se puede encontrar tanto información como ayuda en gran cantidad de foros o la propia *web* del fabricante (62) repleta de tutoriales.

Una vez que se dispone de todos los VIs que conforman el VI principal, sólo resta generar la aplicación ejecutable de la herramienta desde el menú *Build Specifications*, del *Project Explorer*.

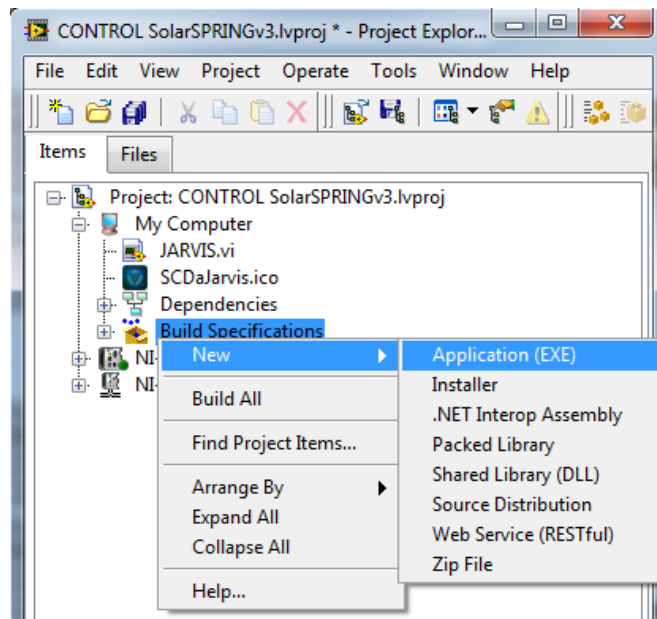


Imagen 3.126. Generación de aplicación .EXE en LabVIEW

Dentro del menú que permite configurar el ejecutable las pantallas principales corresponderían con la elección de los VI que van a ser compilados y cuál va a ser de todos ellos el VI de inicio o *Startup*, además su configuración (cosas tales como ocultar la barra de herramientas de desarrollo al cliente final, se configuran aquí).

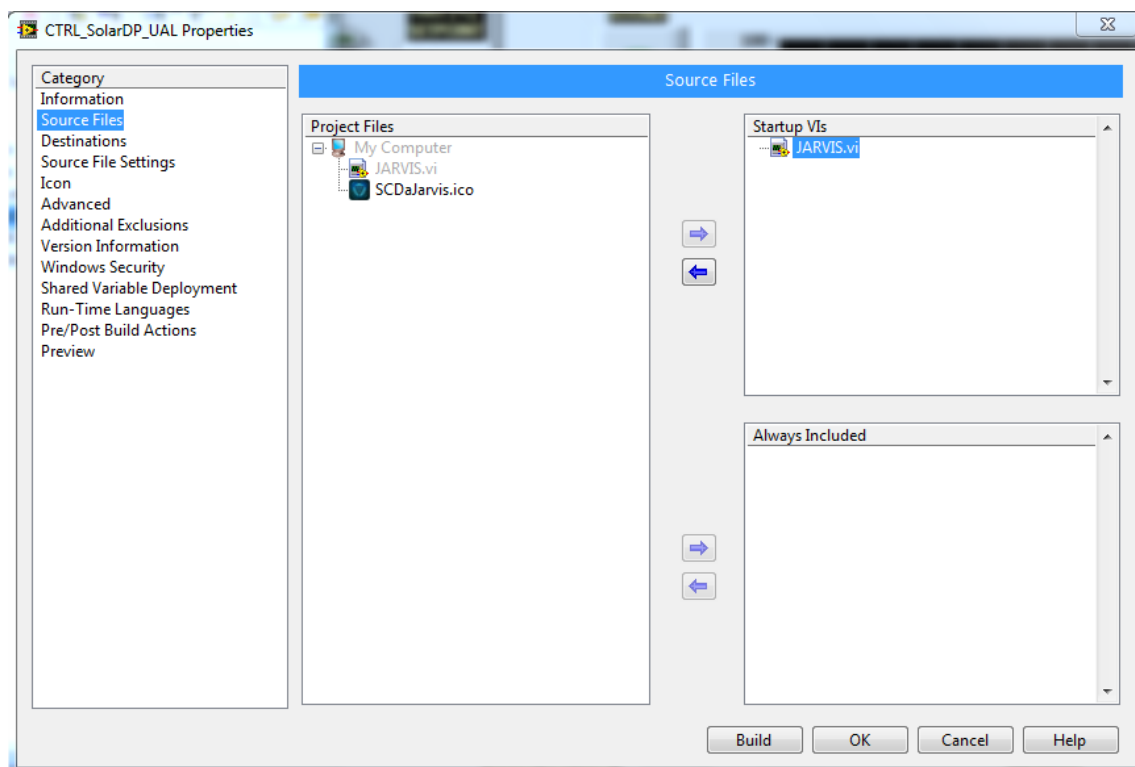


Imagen 3.127. Elección de las VI que formaran parte del ejecutable de la aplicación

Una vez terminada esta configuración fundamental, se pueden elegir ajustar detalles estéticos en el resto de menús, como el icono de la aplicación, ruta de guardado o formato de versión. Sólo resta pulsar en el botón inferior de *Build* para obtener la aplicación compilada a partir del código de la herramienta virtual 'JARVIS.VI', como 'CTRL_SolarDP_UAL.exe'.

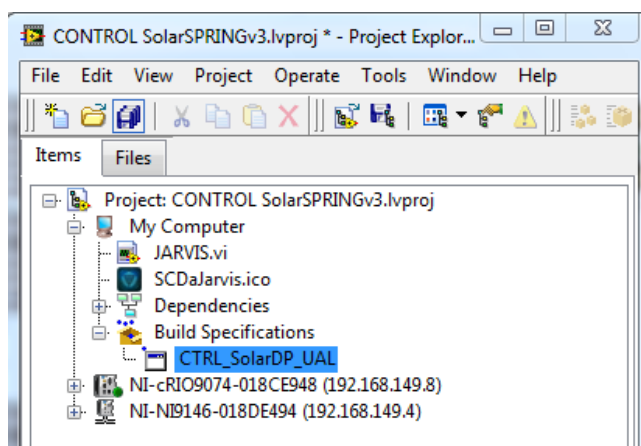


Imagen 3.130. Generación del ejecutable 'CTRL_SolarDP_UAL.exe'

3.4.3. Diseño del interfaz de la herramienta SCADA

El diseño del interfaz del sistema SCADA se ha llevado a cabo siguiendo las consignas dispuestas en la guía GEDIS, que ya se adelantaron en la sección anterior. La primera fase de esta guía consiste en la especificación de los principales elementos de la interfaz tales como la arquitectura, la navegación, los estándares de colores, fuentes, alarmas, etc. También es necesario desarrollar las pantallas de la interfaz, ya sea conforme se vayan definiendo los elementos que la conforman o bien, al finalizar cuando la especificación esté terminada (55).

Como en tantas otras veces ya ha sido citado, el carácter experimental de la planta y sus fases de puesta en funcionamiento no han hecho posible optar por otro modelo que el de desarrollar las pantallas de la interfaz conforme se disponía de los elementos necesarios. Gran parte del aspecto final y depurado de las mismas se debe al aporte continuo de colaboradores, tanto internos, como externos al proyecto, operadores de la planta de desalación y expertos en el desarrollo de sistemas SCADA.

El uso del interfaz y su modo de empleo, han condicionado en gran medida su aspecto final, eliminando pantallas superfluas o añadiendo funcionalidades que a priori no parecían tener cabida. Así, la metodología que proponemos establece una secuencia para la concreción del interfaz como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 3.131. Fases de desarrollo de la interfaz del SCADA (58)

3.4.3.1.Arquitectura

En esta fase se debe establecer un mapa donde se definan de manera general las diferentes pantallas con las que va a contar el operador para interactuar con el sistema. La correspondencia de dichas pantallas con el diseño posterior de navegación debe establecer las relaciones lógicas necesarias para que sea un interfaz intuitivo.

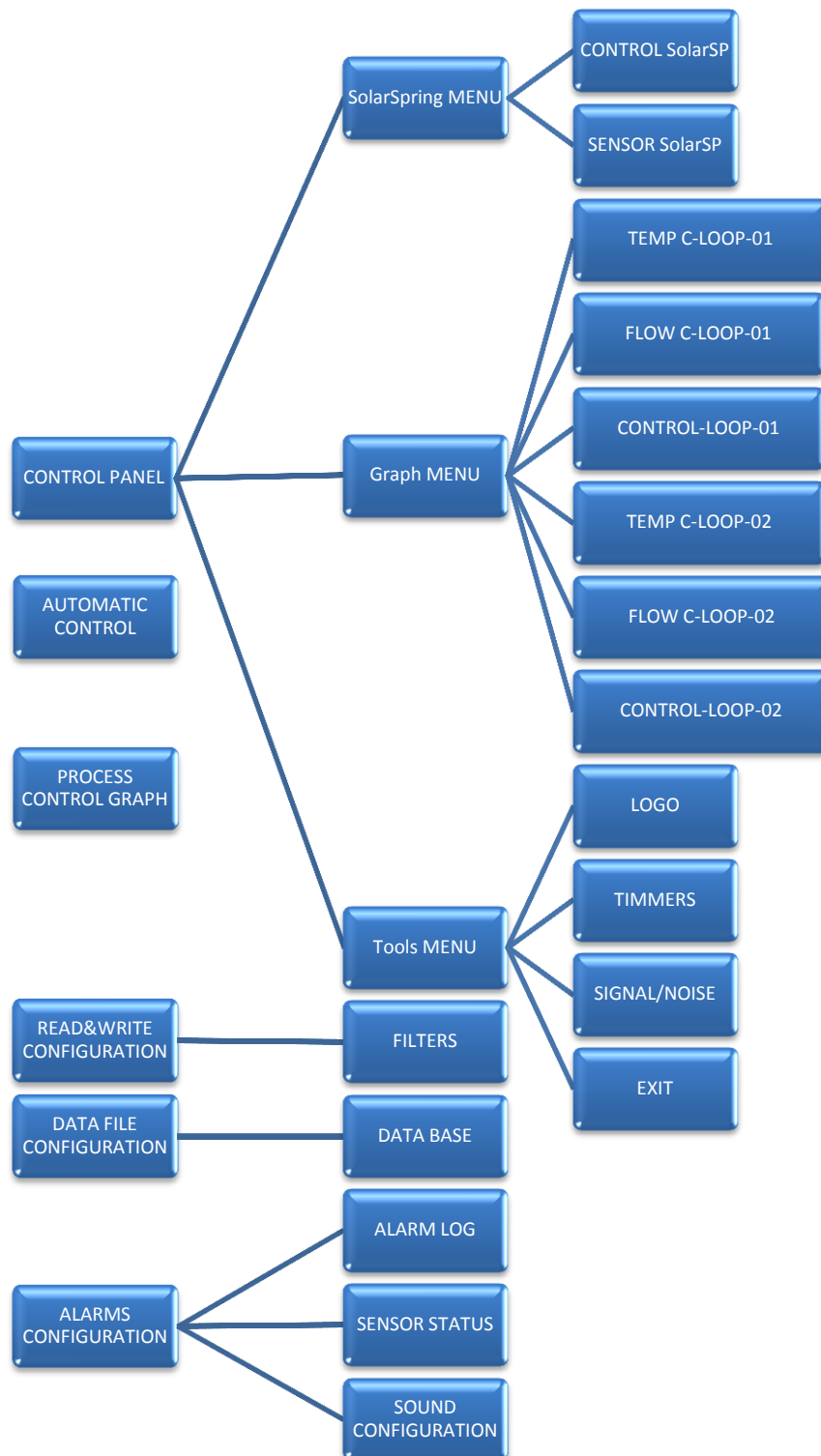


Imagen 3.132. Arquitectura jerárquica de la interfaz de pantallas

Para ello se han seguido las siguientes recomendaciones:

- El número de capas de la jerarquía no exceda de 4 niveles.
- Definir la estructura ancha, en contra de las profundas, para que el operador pueda acceder más rápidamente a la información requerida.
- La arquitectura en forma de mapa debe reflejar la organización de la planta.

Como se puede apreciar en la imagen anterior, la interfaz es de rápida navegación al tratarse de una estructura ancha.

Dado que se ha podido condensar todos los mandos de control (que no los de configuración) en una sola pestaña, la jerarquía podría considerarse de una sola capa.

PANTALLA	FUNCIÓN
CONTROL PANEL	Control manual/automático de toda la instalación. (Acceso a los menús de <i>SolarSpring</i> , <i>Graph</i> y <i>Tools</i>).
AUTOMATIC CONTROL	Pantalla de desarrollo del <i>script</i> del control automático de las instalaciones.
PROCESS CONTROL GRAPH	Gráficas de tendencias de los dos lazos principales de control.
READ & WRITE CONFIGURATION	Visualización de los valores de todas las variables y control de filtros de caudalímetros.
DATA FILE CONFIGURATION	Acceso a la base de datos y archivos de guardado.
ALARMS CONFIGURATION	Configuración de las alarmas principales. (Acceso a los menús de <i>Alarm Log</i> , <i>Sensor Status</i> y <i>Sound Configuration</i>).
SolarSpring	(Acceso a los CONTROL SolarSP o SENSOR SolarSP)
Graph Menu	Muestra una de las 6 gráficas de tendencia predefinida.
Tools Menu	Salida del sistema, Cronómetros, Medidor Señal/Ruido y Logo corporativo.
Alarm Log	Registro de alarmas principal.
Sensor Status	Muestra el estado de todos los sensores de la instalación.
Sound Configuration	Configuración de los archivos de sonido para avisos y alarmas.

Tabla 3.11. Pantallas y sus funciones de la herramienta SCADA

3.4.3.2. Distribución de pantallas y navegación

En este epígrafe se deberían desarrollar las plantillas de desarrollo de la interfaz gráfica, pero debido al empleo final de una sola pantalla de control principal, siendo el resto de configuración, se requiere seguir con extrema cautela las siguientes directrices:

- Considerar que el movimiento del ojo va de arriba abajo y de izquierda a derecha como se muestra en la siguiente imagen. Entonces, la información importante debe ir arriba. El centro de la pantalla es también un lugar de alta visibilidad. Así, la información miscelánea debe ir abajo a la izquierda.
- La densidad de gráficos no debe sobrepasar el 50% del total de la pantalla. Además, la carga de elementos debe estar balanceada en toda la pantalla.
- Las funciones e información críticas deben tener un lugar fijo en la pantalla.

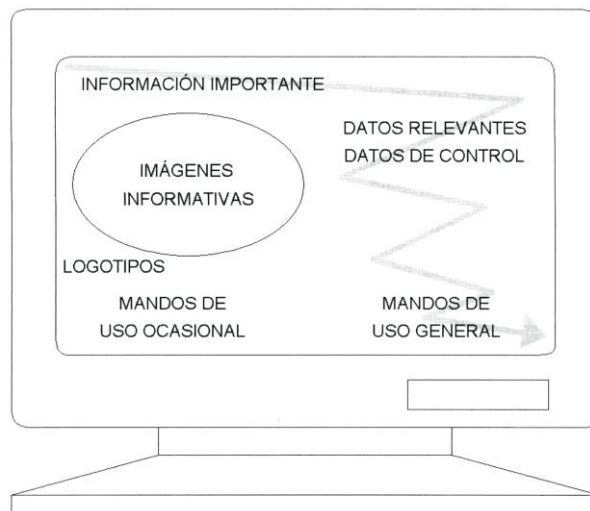


Imagen 3.133. Zonas de pantalla recomendadas (5)

Como se ha adelantado, existen sólo dos tipos de plantillas, una para la pantalla de control principal y otra para las de configuración.

En la pantalla del *Control Panel* fue necesario modificar en gran medida la directriz de densidad de gráficos, puesto que el operario necesitaba tener acceso a la mayor cantidad de información posible de forma desatendida, es por ello que esta plantilla es más densa que la de configuración.

En las pantallas de configuración, donde la mayoría de la información son líneas de comandos se ha procurado agrupar la información por tipo o procedencia en formato de columnas.

El siguiente paso es definir la navegación, las directrices a tener presentes a la hora de establecer la forma de la navegación son las siguientes:

- De usarse menús, estos deben ser agrupados en base a la similitud funcional de sus elementos. El orden en que se muestran las opciones de los menús debe basarse en la importancia de la función o la frecuencia de uso.
- Se recomienda usar zonas predefinidas de la pantalla para ubicar los menús, barras de botones, botones de cierre, etc.
- Si se utilizan iconos, se recomienda usar ayuda textual.
- El área de contacto para pulsar debe ser lo suficientemente grande para que sea fácil de usar.
- La navegación no debe ser un obstáculo para el operador en situaciones de emergencia.
- Cuando la sala de control cuenta con pocos dispositivos de visualización, se debe proporcionar una navegación horizontal de manera que el operador pueda cambiar de área con mayor facilidad.

Es esta última directriz la que lleva a emplear menús del tipo pestaña o *Tab Control* como se definen en *LabVIEW*.

Este tipo de navegación es empleada en el programa SCADA de forma principal para permitir el desplazamiento por todos los menús y submenús de los que dispone, como se puede observar.



Imagen 3.134. Empleo del *Tab Control* de *LabVIEW* en el menú principal

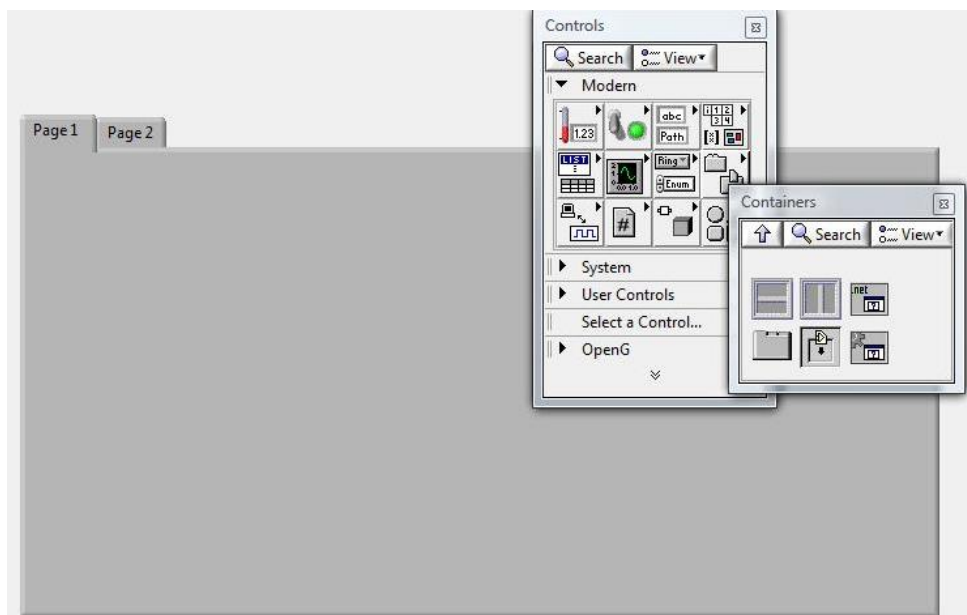


Imagen 3.135. Elemento de programación *Tab Control*

Algunos submenús de la pantalla de *Control Panel* son del tipo *Ring Control*. El motivo es economizar en espacio invertido en esta pantalla tan crítica. Es empleado en submenús que van a ser manipulados de forma ocasional y que no van a ser críticos en el proceso de desalación. Los menús que emplean dicho formato son: *Graph Menu* y *Tools Menu*. Como se muestra la figura, ofrecen un menú desplegable para la elección de la sección que se desea modificar de la pantalla principal.

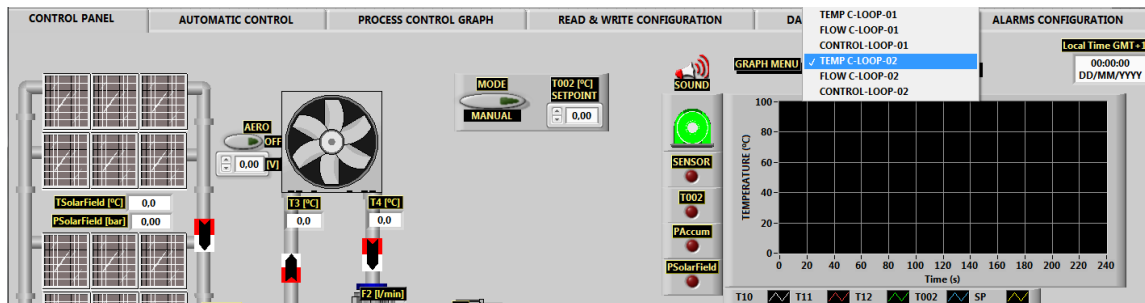


Imagen 3.136. Detalle de empleo del menú tipo *Ring Control* en el *Graph Menu*

3.4.3.3. Color y texto

Una de las herramientas más importantes en manos del desarrollador de un software SCADA es el uso del color en el mismo. Pero esta herramienta puede convertirse en un arma de doble filo, si el diseñador no se ciñe a unas directrices que hagan un uso racional del color, evitando motivaciones meramente artísticas.

Algunas de estas directrices a tener en cuenta son:

- Evitar el uso de intermitencias de colores salvo en casos especiales y aislados. En el caso tratado en este TFG, sólo se emplea una intermitencia para indicar alarma o bien la activación de una bomba a la espera de la apertura de las válvulas de retención.
- Para reforzar la distinción de los colores, utilizar otros elementos como texto, tamaño, forma o posición. Ejemplo de ello es la posición de los *leds* indicadores de estado para las

válvulas de retención RVA y RVB o bien todos los textos de ON/OFF que acompañan a los pulsadores.

- Cuando se combinen colores, se debe maximizar el contraste entre ellos, lo que lleva a emplear por ejemplo un etiquetado en letra amarilla sobre fondo negro, que ocupa el primer puesto según la norma ANSI en nivel de percepción (4).
- Limitar el número de colores a cuatro para principiantes y no utilizar más de siete colores para los expertos en una pantalla.

En lo referente al fondo de pantalla:

- Usar colores neutros para el fondo de la pantalla (gris, arena, azul).
- No usar blanco y negro dado que provocan mucho resplandor.
- Los colores de fondo deben ser contrastantes con los demás elementos.
- Evitar el uso de colores primarios o fuertes en zonas grandes de la pantalla.

Se pueden resumir las elecciones de colores del sistema desarrollado en la siguiente tabla:

ELECCIÓN DEL COLOR EN EL SISTEMA	
Fondo de Pantalla	
Fondo de Pantalla	GRIS (200,200,200)
Alarmas	
Alarma crítica	ROJO/VERDE (Parpadeando)
Aviso	ROJO (255,0,0)
Estado de Equipos	
BOMBAS (ON/OFF)	ROJO (255,0,0) /GRIS (200,200,200)
BOMBAS (STANDBY)	VERDE (64,240,120)(Parpadeando)
VÁLVULAS RETENCIÓN (ON/OFF)	VERDE (0,113,0) /ROJO (255,0,0)
VÁLVULA TODO/NADA (ON/OFF)	VERDE/GRIS
BOTONES	
ACTIVO	ROJO (255,0,0)
DESACTIVO	GRIS (200,200,200)
VARIOS	
TEXTO ETIQUETAS	AMARILLO (255,255,0)
FONDO ETIQUETAS	NEGRO (0,0,0)
TEXTO GENÉRICO	NEGRO (0,0,0)

Tabla 3.12. Elección del color en el sistema

En lo que respecta a la información textual, es importante regular el uso del texto siguiendo unas pautas concretas:

- Evitar el aglutinamiento de texto tanto horizontal como verticalmente.
- Alinear el texto en pantalla agrupando las etiquetas a la izquierda y los números a la derecha.
- No usar letras mayúsculas en todas las letras del texto. Procurar combinarlas con las minúsculas.
- El tamaño de la fuente debe ser tal que se pueda leer a distancia por el operador.
- Preferiblemente usar fuentes *sans serif*.
- No se debe utilizar más de tres fuentes en la interfaz, ni más de tres tamaños de la misma fuente.

En este TFG se ha seleccionado un único tipo de letra *sans serif* CALIBRI de 15 puntos para todos los textos, salvo los títulos de las pestañas del menú principal donde se ha empleado tamaño 18. Se ha procurado evitar el aglutinamiento en la medida de lo posible y se ha observado el no abusar del empleo de las mayúsculas.

3.4.3.4. Equipos, valores y tablas

Llegados a esta fase se deben definir los símbolos y elementos gráficos en general que van a representar elementos como las bombas, válvulas proporcionales, etc. Como ya viene siendo habitual, existen unas directrices que recomiendan:

- Los símbolos e iconos no deben ser ambiguos.
- Preferentemente, deben ser enmarcados y delimitados con borde oscuro.
- Deben ser simples, cerrados y de un tamaño suficientemente visible. Se debe evitar detalles y realismo innecesarios.

A continuación se listarán los elementos gráficos empleados, que se desarrollaran en profundidad en el apartado 4.1 del capítulo Resultados:

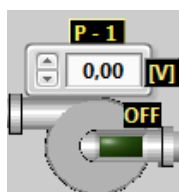


Imagen 3.137. Icono Bomba OFF

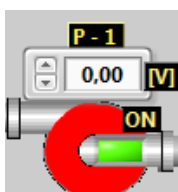


Imagen 3.138. Icono Bomba ON

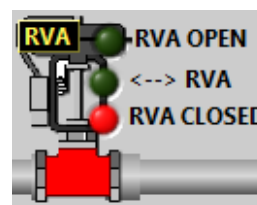


Imagen 3.139. Icono de Válvula de retención Cerrada

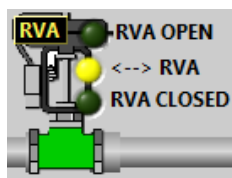


Imagen 3.140. Icono de Válvula de retención Cambiando de Estado

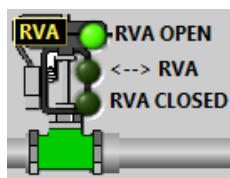


Imagen 3.141. Icono de Válvula de retención Abierta



Imagen 3.142. Icono de V2 OFF



Imagen 3.143. Icono de V2 ON

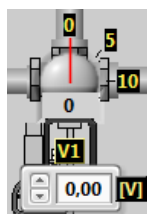


Imagen 3.144. Icono de Válvula proporcional

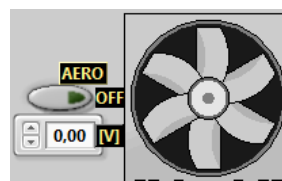


Imagen 3.145. Icono de Aerotermo OFF

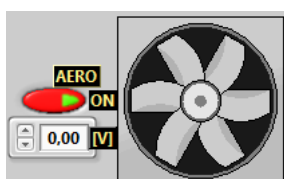


Imagen 3.146. Icono de Aerotermo ON

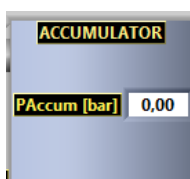


Imagen 3.147. Icono del Acumulador



Imagen 3.148. Icono de alarma (ON)



Imagen 3.149. Icono de alarma (OFF)



Imagen 3.150. Icono de sonido activado (ON)



Imagen 3.151. Icono de sonido desactivado (OFF)



Imagen 3.152. Icono de cierre de la aplicación

Las gráficas de tendencias permiten representar de forma amigable para el usuario la evolución de las variables del sistema. Estas utilidades deben permitir:

- Representar variables simultáneamente en una misma gráfica.
- Visualizar las variables mientras se están adquiriendo los datos, así como los valores almacenados.
- Visualizar los valores numéricos de los datos.
- Desplazamiento a lo largo de todo el registro histórico (*scroll*).
- *Zoom* (ampliación y reducción) de una determinada parte de la gráfica (58).

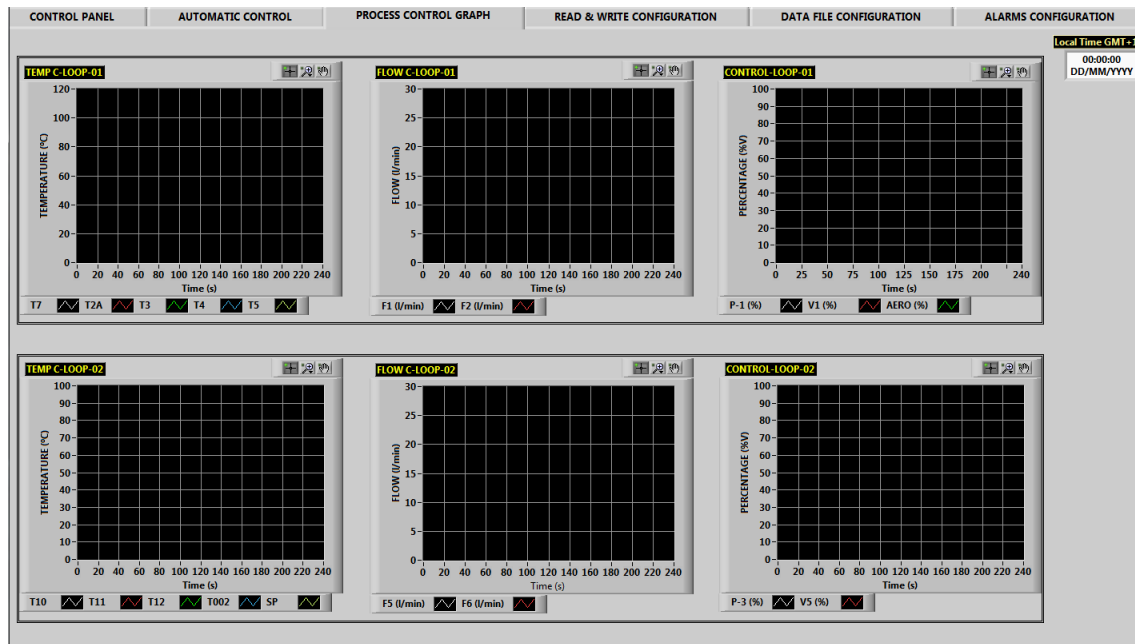


Imagen 3.153. Gráficas de tendencia de los lazos de control

3.4.3.5. Alarmas

En cualquier proceso industrial son de vital importancia las alarmas. Trabajar en un entorno hostil rodeado de tuberías a altas presiones, temperaturas, etc. hace que sea imprescindible poder alertar al operador sobre situaciones anómalas que se presentan en el proceso e implican una intervención de él.

Las directrices generales que deben ser observadas al definir las alarmas son las siguientes:

- Las alarmas deben tener un componente textual en la ventana de alarmas y uno gráfico en el sinóptico de proceso respectivo.
- Se debe proporcionar un método de silenciar el sonido de la alarma una vez ha sido reconocida, aunque la situación anómala persista.
- La ventana o zona de alarmas debe ser accesible y visible siempre para el operador.
- El texto de las alarmas debe mostrar el equipo concreto, el parámetro anómalo, la hora y la fecha del evento. Debe ser un mensaje conciso y claro.
- El código de colores de las alarmas debe complementarse con elementos como visibilidad, su posición o un sonido.
- Se debe evitar el exceso de alarmas y mensajes al operador.
- Los mensajes y alarmas deben ser congruentes con los estándares de color, fuentes, texto, etc.
- Para constatar el reconocimiento de la situación, el operario debe validar las alarmas críticas.

En el sistema desarrollado los mensajes emergentes acompañan al código de colores en intermitencia, la posición central de la pantalla y el sonido de la alarma.

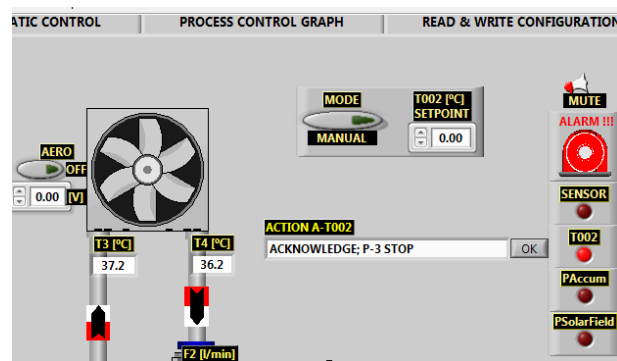


Imagen 3.154. Acción solicitada al operador tras dispararse la alarma T002

Cuando el operador ingresa la acción realizada, o simplemente, acepta las acciones por defecto que le sugiere el sistema, la línea de comandos emergente desaparecerá y quedará registrada en el menú *Alarm Log* de la venta de *Alarms Configuration*:

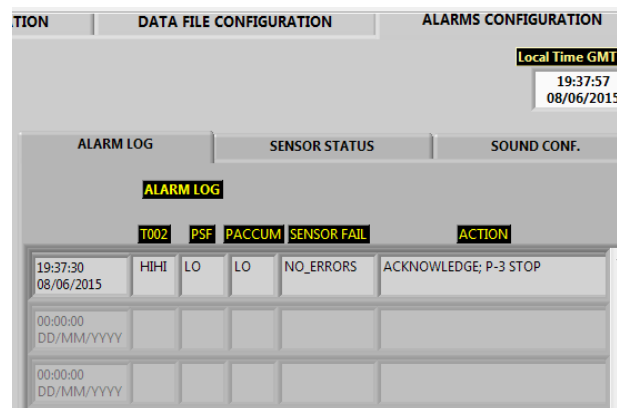


Imagen 3.155. Registro de la alarma T002 en Alarm Log

Dado que todos los procesos a controlar en la instalación poseen una gran inercia, añadido al hecho que se trabaja cerca de los límites de temperatura y presión de muchos de los sistemas que la componen (Acumulador, Campo Solar, MD, etc.) Se hace imperativo fijar sólo los niveles de alarma crítica, pues no hay prácticamente margen para una advertencia antes de que se alcance la alarma crítica, pues precisamente esa correspondería con la zona de trabajo.

De este modo sólo existen valores de alarma HIHI y LO para las variables de alarma programadas en el sistema.

Por otro lado, se ha implementado una alarma para los sensores, cuyo umbral viene marcado por su velocidad de cambio, lo que se define como umbral ROC (*Ratio of Change*) (60). Se basa en la observación de dos valores adquiridos consecutivamente, su diferencia es lo que nos fija ese nuevo límite o umbral. En nuestro caso se implementó con la media de los tres anteriores. El resultado es el mostrado en la siguiente imagen.

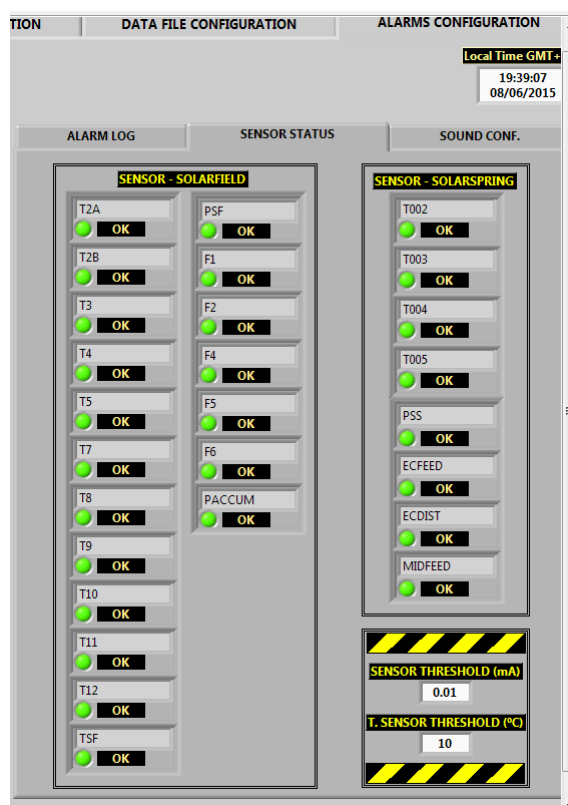


Imagen 3.156. Detalle de Sensor Status con todos sus sensores OK, aunque T002 esté disparada

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Herramienta SCADA

Bajo este epígrafe se tratará de describir con detalle la interfaz gráfica del sistema SCADA implementado en la planta de desalación. La idea es aproximarse a un manual de usuario de cómo funcionan los elementos a disposición del operador de la planta.

La herramienta SCADA se inicia desde el icono de la aplicación CTRL_SolarDP_UAL.exe:



Imagen 4.1. Icono de la aplicación CTRL_SolarDP_UAL

Aparece la pantalla de acceso al sistema, donde se debe ingresar el nombre de usuario y clave para poder acceder a la herramienta SCADA.

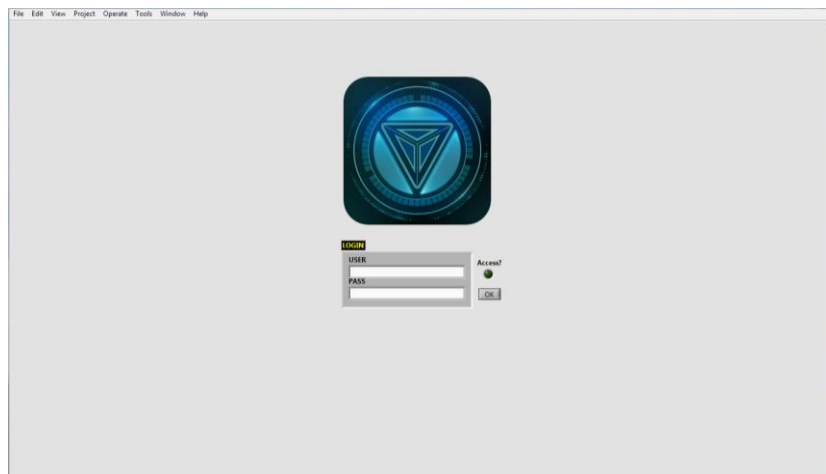


Imagen 4.2. Pantalla de acceso de usuarios

Dado que los distintos perfiles de usuario disponen de diferentes niveles de acceso a la herramienta, en los epígrafes siguientes se describirá el más completo de ellos, que posee total funcionalidad, el perfil administrador.

4.1.1. Control Panel (pantalla de control)

Desde esta pantalla principal se gobierna la totalidad de las instalaciones, siendo el resto simples menús de configuración de facetas puntuales de la misma.

Se encuentra el sinóptico descriptivo de la planta extendiéndose en diagonal desde la esquina superior izquierda hasta la inferior derecha aprovechando las zonas de visión recomendadas (4). Existen 6 zonas de interacción diferenciadas:

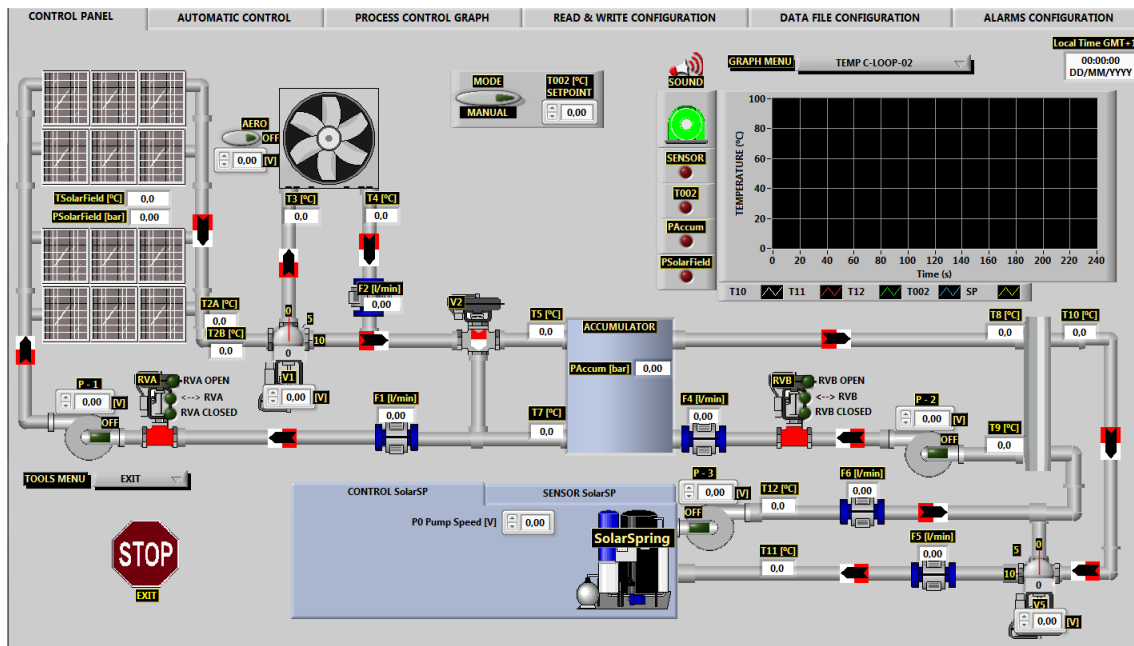


Imagen 4.3. Control Panel

- 1ª) Selector de Modo Automático/Manual (Zona Central-Superior): Por defecto el sistema arranca en modo manual, en este modo, el *setpoint* seleccionado de temperatura no tiene ningún efecto sobre el sistema. Cuando se selecciona el Modo Automático, el sistema tratará de trabajar para alcanzar el valor fijado de temperatura, ejecutando el código inyectado en el *script* de la pestaña *Automatic Control* (como se verá en el apartado 4.1.2.).



Imagen 4.4. Detalle del selector de modo en MANUAL

Además desaparecerán de la pantalla principal todos los puntos de entrada de comandos y botones y se convertirán en meros indicadores de estado los iconos que, en modo manual, gobiernan las bombas y válvulas. Por otro lado el menú de la *SolarSpring* quedará enclavado en la pantalla que muestra las lecturas de los sensores.

- 2ª) Zona de Alarmas (Zona Central): Esta zona cuenta con dos tipos de elementos, unos informativos, los cuales están siempre visibles y otros específicos de situaciones de alarma que sólo aparecen en el centro de la pantalla con información detallada cuando se dispara una alarma.

Entre los primeros existe un megáfono con el cual se elegirá silenciar, o no, la alarma del sistema.

Una baliza que se encuentra en verde estático para indicar la ausencia de alarma y pasa a un estado parpadeante de rojo/verde para indicar un estado anómalo del sistema. A esta baliza general se pueden añadir los *leds* indicadores de estado para las alarmas críticas del sistema.

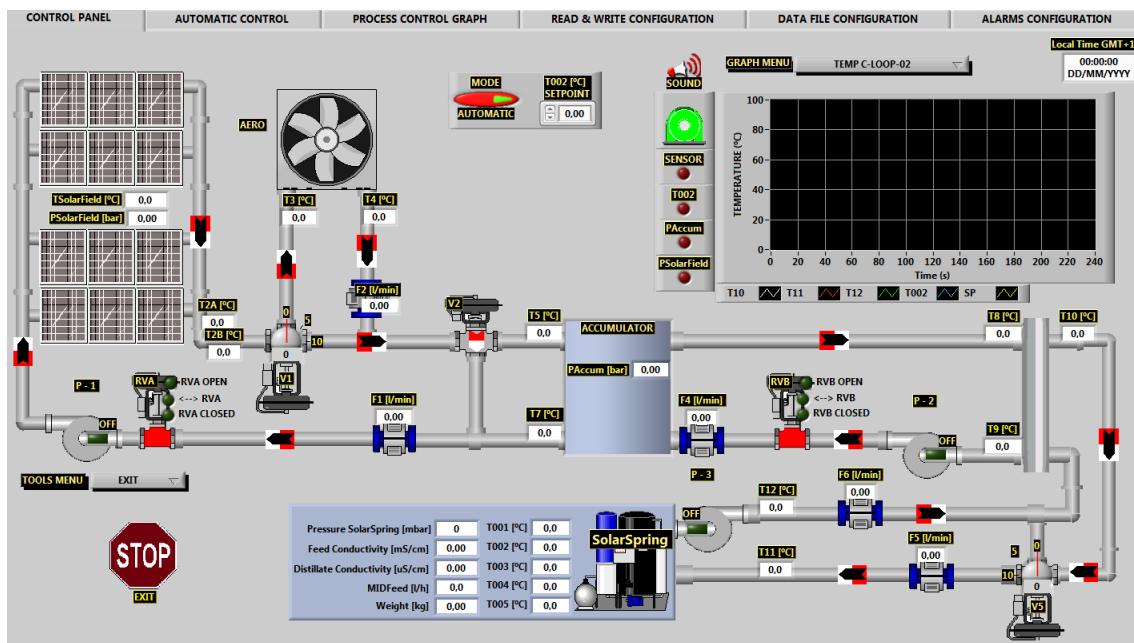


Imagen 4.5. Pantalla de Control Panel en Modo Automático

En el segundo grupo se encuentran los mensajes emergentes de usuario cuando se produzca una alarma y la línea de comandos que solicita información al operador de las medidas a tomar frente a la alarma concreta. Una vez atendida la alarma, dicha línea de comandos desaparecerá aunque la alarma persista.

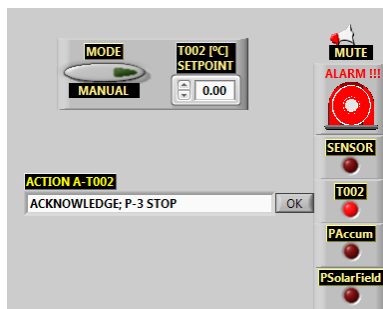


Imagen 4.6. Detalle de Alarma T002

- 3ª) Gráficas de tendencias (Zona Superior-Derecha; *Graph Menu*): Desde este menú se puede seleccionar entre un conjunto de 6 gráficas de tendencias de las principales variables del sistema que gobiernan los lazos de control. Para el primer y segundo lazo se destinan 3 gráficas independientes para cada uno, con las temperaturas, caudales y señales de control de los mismos.

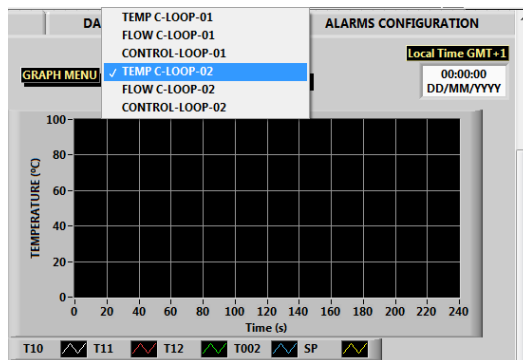


Imagen 4.7. Detalle de gráficas de tendencias del Graph Menu

- 4ª) *SolarSpring* (Zona Central-Abajo): En estas dos pestañas se encuentra el control y las lecturas de los sensores de la unidad desaladora *SolarSpring*. Como se puede observar en las imágenes siguientes, sólo existe como control automatizado la velocidad de la bomba de destilado (0-5 V).

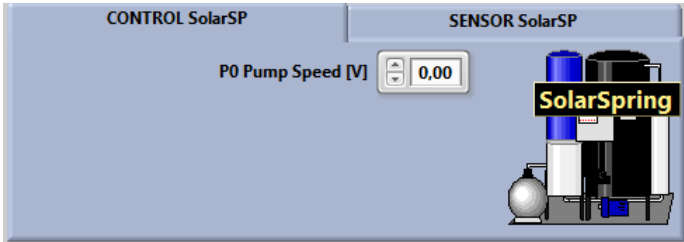


Imagen 4.8. Pestaña de control de la desaladora *SolarSpring*

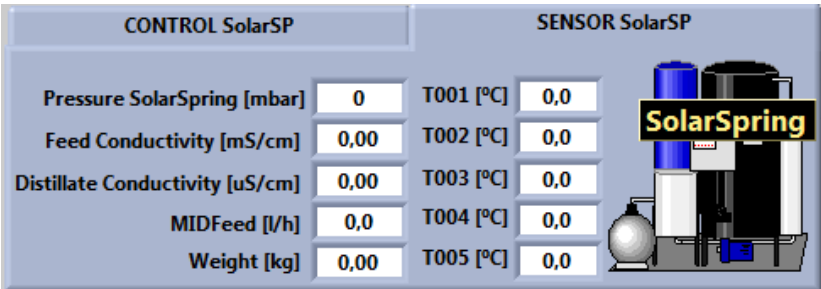


Imagen 4.9. Pestaña de lectura de los sensores de la desaladora *SolarSpring*

- 5ª) *Tools Menu* (Zona Inferior-Izquierda): En este menú desplegable se engloban una serie de herramientas y utilidades, como son un conjunto de cronos, útiles para el operador cuando realiza un ensayo de desalación y una medida del factor Señal/Ruido de los sensores más delicados de la instalación. Además se incluye la salida del sistema y el logo corporativo.



Imagen 4.10. Cronos del *Tools Menu*

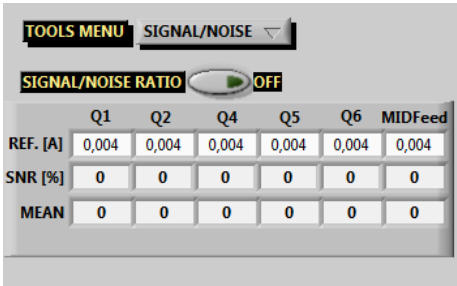


Imagen 4.11. Medida de SNR en el *Tools Menu*

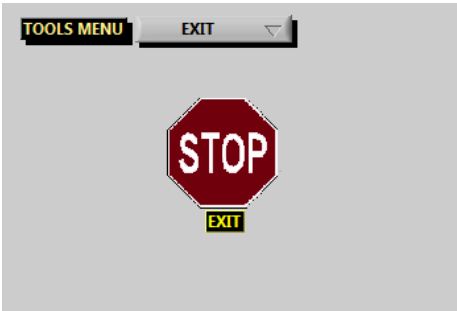


Imagen 4.12. Salida del programa SCADA



Imagen 4.13. Logo corporativo

- 6ª) Sinóptico General (Zona Diagonal): Aquí se encuentra el “corazón” del sistema de control y adquisición de datos. Los elementos con los cuales el operador no tendrá interacción y serán simplemente indicadores corresponderán con las sondas de temperatura, presión y caudalímetros.



Imagen 4.14. Detalle del indicador para el caudalímetro F1

Los indicadores de circulación del agua de proceso vendrán indicados por el cambio de color de gris a verde de las propias tuberías.

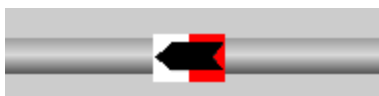


Imagen 4.15. Tubería sin circulación de agua de proceso



Imagen 4.16. Tubería con circulación de agua de proceso

Y el sistema de actuadores quedará reducido a las Bombas (P-1, P-2 y P-3), Aerotermo, Válvulas de retención (RVA y RVB), Válvulas proporcionales (V1 y V5) y Válvula todo/nada (V2).

BOMBAS: es posible activarlas pulsando directamente en su icono, cambiando de gris a rojo. Cabe señalar que se comprueba la apertura de las válvulas de retención antes de ejecutar la orden de apertura, existiendo un estado de preparado, en el cual el indicador *led* parpadea, esperando a que la válvula correspondiente se abra por completo. Una vez que la válvula de retención asociada está abierta, se activa la bomba y el *led* indicador ON/OFF se queda encendido fijo. Con las flechas de incremento/decremento o ingresando directamente la cantidad.

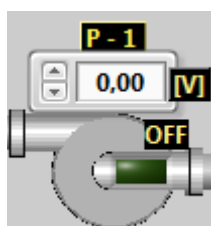


Imagen 4.17. Control de bomba P-1 parada

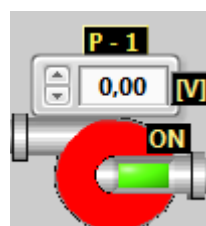


Imagen 4.18. Control de bomba P-1 funcionando

AEROTERMO: se controla mediante su botón de ON/OFF y la selección de velocidad se hace de forma similar a la indicada para las bombas. La única salvedad es que no posee condición inicial de marcha. Puede funcionar siempre que se solicite. La animación del ventilador, a parte del selector del botón en rojo, nos da idea del funcionamiento del Aerotermo.

VÁLVULAS DE RETENCIÓN: poseen tres estados, cerradas, abiertas y maniobra. Este último estado indica que la válvula está en el período de transición de cerrado a abierto o viceversa. Este estado como se describió fue necesario debido a los más de 3 minutos que se tardaba en completar la maniobra. Pulsando en el propio icono de la válvula se consigue la conmutación. Quedará marcado como roja cuando la válvula esté cerrada y verde cuando se esté abriendo o esté completamente abierta.

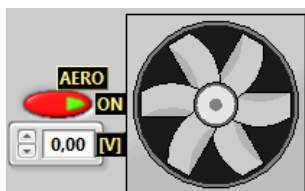


Imagen 4.19. Control del Aerotermo encendido

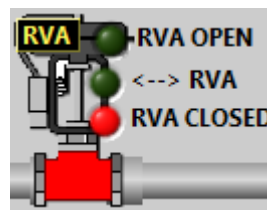


Imagen 4.20. Control de RVA cerrada

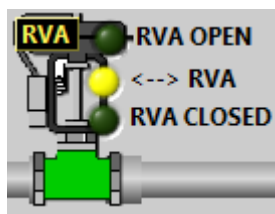


Imagen 4.21. Control de RVA conmutando (Cerrado<-->Abierto)

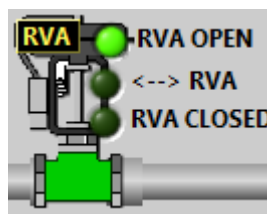


Imagen 4.22. Control de RVA abierto

VÁLVULAS PROPORCIONALES: estas válvulas no poseen control de ON/OFF, tan sólo una entrada de datos para seleccionar la posición similar a la de las bombas y dos *displays* (uno gráfico y el otro digital) que muestran el estado real de la maniobra de la válvula y el grado de consecución de la consigna de posición.

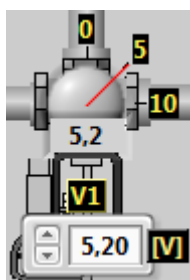


Imagen 4.23. Control de la válvula proporcional V1

VÁLVULAS TODO/NADA: su comportamiento digital hace que sólo sea necesario atender al icono de la válvula, que hace las veces de control, para saber en qué posición se encuentra y hacia donde dirigimos el caudal de la instalación. Estas dos posiciones direccionan el caudal hacia el campo de captadores (OFF) o hacia el depósito Acumulador (ON).



Imagen 4.24. Control de V2 (OFF)



Imagen 4.25. Control de V2 (ON)

De esta forma queda descrita de forma completa la principal pantalla por funcionalidades de toda la herramienta. Cabe añadir que se han programado consejos y ayudas para cada uno de los elementos descritos. Estos se mostrarán al usuario en tiempo de ejecución ayudando a familiarizarse con el software.

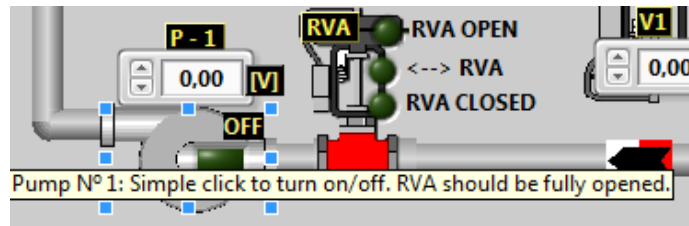


Imagen 4.26. Consejos y ayuda del elemento P-1

4.1.2. Automatic control (control automático)

En la segunda pestaña de la herramienta SCADA tiene cabida el entorno de programación, bajo la forma de un script de MATLAB, del control automático de la planta.

En la parte izquierda aparece un listado de los nombres de las variables, tal y como están declaradas en el *Workspace* de MATLAB, cuyo nombre es el que debe emplearse para acceder a ellas desde el *script*.

En la parte superior se puede fijar el período de ejecución del lazo de control (modificable en tiempo de ejecución) y justo a su lado el botón que activa la ejecución del *script*. Cuando desde la pantalla principal se selecciona el modo automático el botón de *Control Script ON/OFF* se activa por defecto. La utilidad de poder activar y desactivar el *script* vale para probar y depurar código desde el modo manual, donde aún se posee control sobre los actuadores.

La zona de la derecha muestra un interfaz de error derivado de algún tipo de fallo de comunicación o incidencia entre el SCADA y MATLAB.

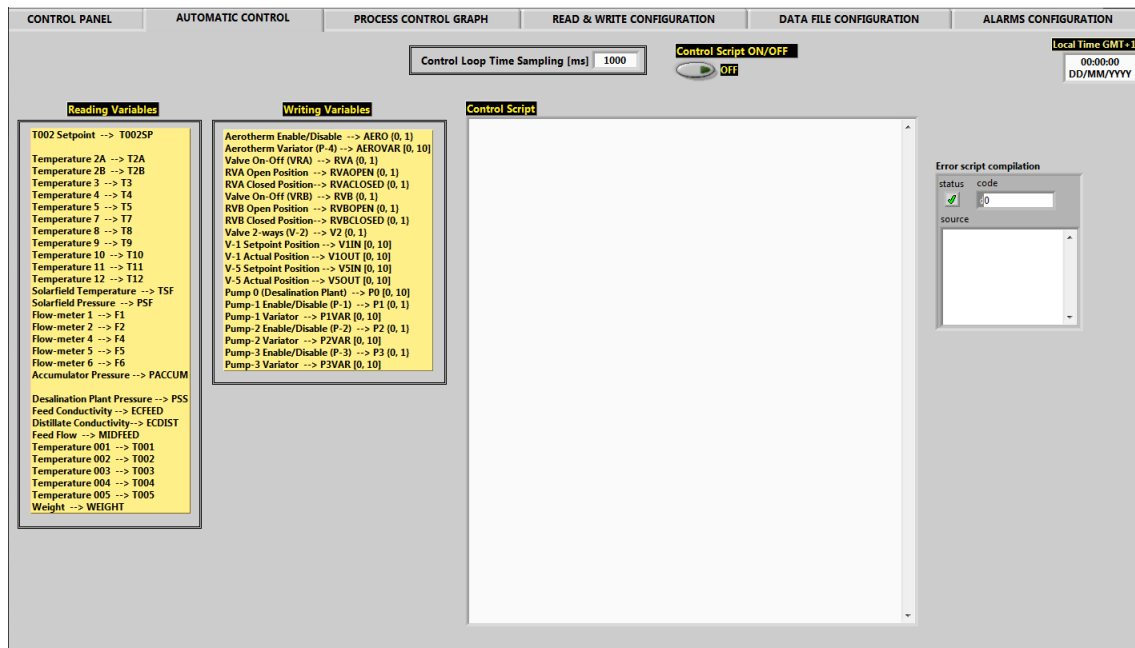


Imagen 4.27. Automatic Control

4.1.3. Process Control Graph (gráfico de control de proceso)

La pestaña muestra de forma completa todas la gráficas de tendencia. De una forma visual, el operador dispone de una gran cantidad de información de los dos lazos de control principales de la planta. Además almacenan en tiempo de ejecución un histórico de todos los datos adquiridos, los cuales pueden ser consultados empleando las herramientas de control que cada grafica posee en su esquina superior derecha.

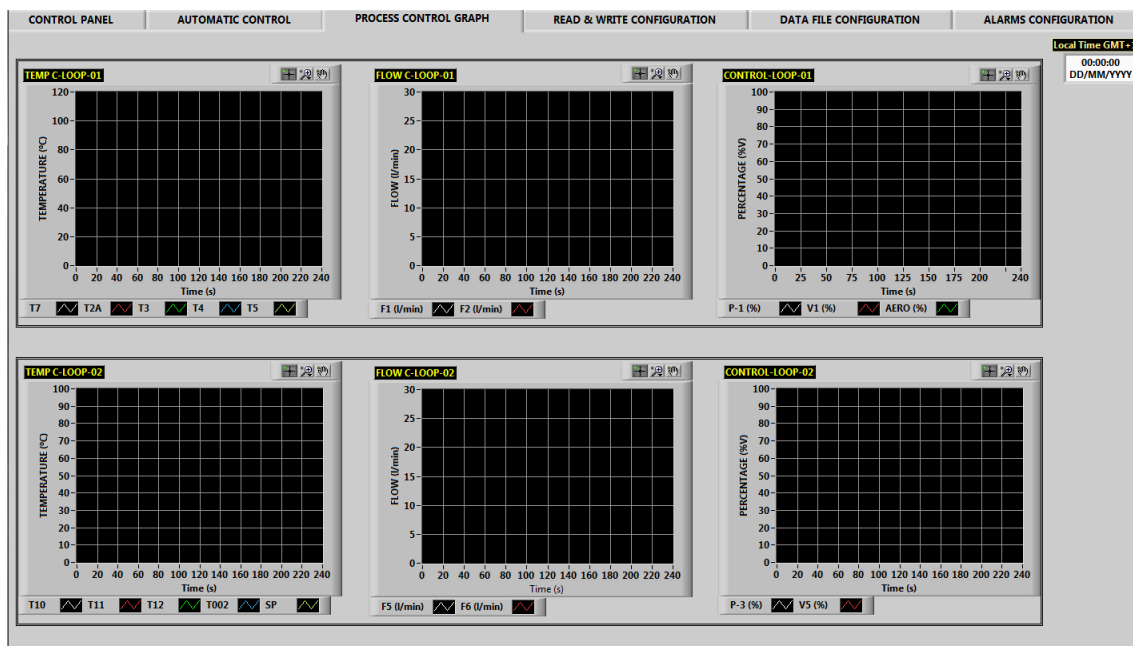


Imagen 4.28. Process Control Graph

4.1.4. Read & Write Configuration (configuración de lectura y escritura)

Como su nombre indica, en esta pantalla se dispone de una visión agrupada de todas las variables de lectura (sensores) y de escritura (actuadores). En la parte superior de cada uno de los grupos se puede elegir el tiempo de muestreo de cada uno de los lazos de forma independiente.

Dentro de la agrupación de lectura existen 3 bloques diferenciados, las lecturas del campo solar, las propias de la desaladora y por último el control de los filtros implementados para los caudalímetros de la planta y el caudalímetro de la desaladora. Desde aquí se puede configurar el número de muestras que emplean en el filtrado los mismos, así como activar o desactivarlos.

La agrupación de actuadores no distingue entre campo solar y desaladora porque, recordemos, esta última sólo disponía de un grado de control a través de la bomba de destilado.

4.1.5. Data File Configuration (configuración de archivos de datos)

La quinta pestaña del programa alberga la configuración del guardado de los datos. Existen dos bloques diferenciados, el izquierdo, donde los datos son grabados en formato de texto plano por columnas y el derecho, el cual gobierna el registro de las variables del sistema en la base de datos.

En el primer bloque se puede configurar la ruta de guardado, que no el nombre. Esto se debe a que es generado automáticamente con la fecha incrustada, para evitar errores de nomenclatura que puedan derivar en la pérdida de datos por sobre escritura. Además se puede controlar el período de guardado de estos archivos.

Por directrices expresas de los supervisores de la planta, se han generado cuatro tipos de archivos de este tipo, dos con las variables designadas como necesarias para el proceso, uno del campo solar y otro para la desaladora y otros dos con la misma información pero en valores de tensión y corriente de los sensores.

CONTROL PANEL **AUTOMATIC CONTROL** **PROCESS CONTROL GRAPH** **READ & WRITE CONFIGURATION** **DATA FILE CONFIGURATION** **ALARMS CONFIGURATION**

Reading Time Sampling [ms] 1000 Writing Time Sampling [ms] 1000 Local Time GMT+1 00:00:00 DD/MM/YYYY

SOLARFIELD			DESALINATION PLANT			Writing Actuators				
Reading Conf.	Name	Signal (mA)	Value	Reading Conf.	Name	Signal (mA)	Value	Writing Conf.	Name	Value
T2A	T2A	0	0	PSS	PSS	0	0	AERO	AERO	0
T2B	T2B	0	0	ECFEED	ECFEED	0	0	AEROVAR	AEROVAR	0
T3	T3	0	0	ECDIST	ECDIST	0	0	RVA	RVA	0
T4	T4	0	0	MIDFEED	MIDFEED	0	0	RVAOPEN	RVAOPEN	0
T5	T5	0	0	T001	T001	0	0	RVACLOSED	RVACLOSED	0
T7	T7	0	0	T002	T002	0	0	RVB	RVB	0
T8	T8	0	0	T003	T003	0	0	RVBOPEN	RVBOPEN	0
T9	T9	0	0	T004	T004	0	0	RVBCLOSED	RVBCLOSED	0
T10	T10	0	0	T005	T005	0	0	V2	V2	0
T11	T11	0	0	WEIGHT	WEIGHT	0	0	V1IN	V1IN	0
T12	T12	0	0					V1OUT	V1OUT	0
TSF	TSF	0	0					V5IN	V5IN	0
PSF	PSF	0	0					V5OUT	V5OUT	0
F1	F1	0	0					P1	P1	0
F2	F2	0	0					P1VAR	P1VAR	0
F4	F4	0	0					P2	P2	0

Filter electric signals fs (Endress-Hauser) **ON** Samples 10 Filter electric signals Midfeed (GF) **OFF** Samples 20

Imagen 4.29. Read & Write Configuration

CONTROL PANEL **AUTOMATIC CONTROL** **PROCESS CONTROL GRAPH** **READ & WRITE CONFIGURATION** **DATA FILE CONFIGURATION** **ALARMS CONFIGURATION**

Saving Time Sampling [ms] 1000 Saving path C:\ Local Time GMT+1 00:00:00 DD/MM/YYYY

Save Data **ON**

Last save:

File path (Solar Field Data):

File path (Desalination Plant Data):

Save Electric Signals **ON**

Last save:

File path (Solar Field Data):

File path (Desalination Plant Data):

Save Database **OFF**

Record Time Period [ms] 5000 Data Table: MAINDAT

Connection DATABASE: C:\conexionDP_DATABASE.udl

DATABASE- MAINDAT ERROR

status	code	source
✓	0	

DATABASE- EVENT ERROR

status	code	source
✓	0	

DATABASE- ALARM ERROR

status	code	source
✓	0	

Imagen 4.30. Data File Configuration

En estos archivos no se guardan valores de actuadores u operarios. Además hay un tercer tipo de archivo que sólo se generará en caso de producirse algún tipo de alarma. En este último archivo de texto si aparece información del usuario.

En el segundo bloque se debe seleccionar la ruta donde se encuentra el archivo de enlace de datos de la base de datos y la periodicidad del guardado. Las ventanas de error de cada una de las tres tablas que conforman la base de datos (ALARM, EVENT y MAINDAT) informarán de cualquier problema derivado de su manejo, acceso, etc.

FECHA	HORA	USER	A-T002	A-PSOLARF	A-PACCUM	SENSOR FAI	ACTION	AERO	AEROVAR	RVA	RVAOPEN	RVACLOSED
08/06/2015	17:46	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:46	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:48	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:48	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:48	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:49	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:49	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:49	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	17:56	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	17:57	OVERLORD	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	18:13	ADMINISTRATI	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	18:14	ADMINISTRATI	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	18:21	ADMINISTRATI	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	18:23	ADMINISTRATI	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	18:37	ADMINISTRATI	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	18:38	ADMINISTRATI	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	19:37	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS		0	0	0	0	1
08/06/2015	19:38	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:40	OVERLORD	HIHI	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:42	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:42	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:43	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:45	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:46	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	0	0	0	1
08/06/2015	19:47	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	1	0	0	0
08/06/2015	19:49	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	1	0	0	0
08/06/2015	19:50	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	1	1	1	0
08/06/2015	19:50	OVERLORD	LO	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDG	0	1	1	1	0

Imagen 4.31. Detalle de la tabla EVENT de la base de datos del sistema SCADA

4.1.6. Alarms Configuration (configuración de alarmas)

Desde la última pestaña de configuración se tiene acceso al control y registro de alarmas de todo el sistema. Se distinguen tres zonas principales.

La primera, situada a la izquierda, comprende la zona donde fijar tanto los límites de las tres medidas críticas de la instalación (presión del campo solar, presión del Acumulador y temperatura T002) como los valores de histéresis para las mismas.

La segunda zona ocupa la zona central y básicamente es un conjunto de dos indicadores gráficos, el primero de ellos que indica el valor actual de la variable responsable de disparar la condición de alarma y el segundo ofrece una perspectiva de la tendencia de la misma.

Por último en la zona de la izquierda se presenta un menú con el registro de alarmas, estatus de los sensores y configuración de sonido de avisos y alarmas.

- REGISTRO DE ALARMA (Imagen 4.33): refleja el valor de las alarmas principales en sus tres primeras columnas, el nombre del sensor que falla (si es esa la fuente de alarma) y por último el comentario del operador que atendió a la alarma.
- ESTADO DE LOS SENSORES (Imagen 4.34): en esta pestaña el estatus de todos los sensores de la planta queda reflejado de forma visual mediante un testigo luminoso. Si su color es verde el estado del sensor es OK, en cambio, si alguno aparece como rojo el estado del sensor cambia a FAILURE. Dado que lo que se implementa es una ventana de esperanza, el parámetro THRESHOLD controla la anchura de la misma. Debido a la diferente naturaleza de los sensores de temperatura con el resto, este parámetro posee distintos valores para ambos, como se puede apreciar en la Imagen 4.34.
- CONFIGURACIÓN DE SONIDO (Imagen 4.35): desde esta ventana simplemente se puede seleccionar el archivo de sonido que se va a reproducir para los avisos y las alarmas del sistema. Se deben emplear archivos en formato .wav y a ser posible de poco peso. La idea del aviso no es interpretar una melodía completa, sino alertar de forma efectiva a un operador de un evento importante. Los avisos sonoros serán reproducidos en el computador SCADA que cuenta con un sistema de altavoces conectados a la salida de la tarjeta de sonido interna de la placa.

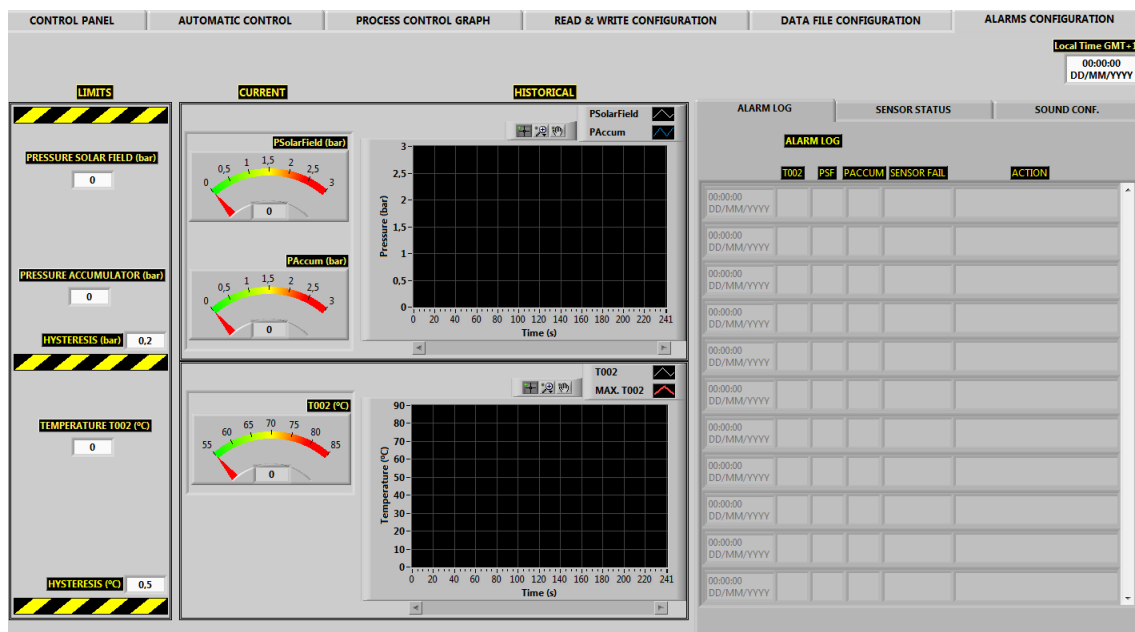


Imagen 4.32. Alarms Configuration

ALARM LOG					
ALARM LOG					
	T002	PSF	PACCUM	SENSOR FAIL	ACTION
19:37:30 08/06/2015	HIHI	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDGE; P-3 STOP
19:41:52 08/06/2015	HIHI	LO	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDGE; P-3 STOP
19:53:36 08/06/2015	LO	HIHI	LO	NO_ERRORS	ACKNOWLEDGE
19:53:54 08/06/2015	LO	HIHI	HIHI	NO_ERRORS	ACKNOWLEDGE
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					
00:00:00 DD/MM/YYYY					

Imagen 4.33. Registro de alarmas de la pestaña Alarm Log

ALARM LOG			SENSOR STATUS			SOUND CONF.		
ALARM LOG			SENSOR - SOLARFIELD			SENSOR - SOLARSRING		
T2A	OK		PSF	OK		T002	OK	
T2B	OK		F1	OK		T003	OK	
T3	OK		F2	OK		T004	OK	
T4	OK		F4	OK		T005	OK	
T5	OK		F5	OK		PSS	OK	
T7	OK		F6	OK		ECFEED	OK	
T8	OK		PACCUM	OK		ECDIST	OK	
T9	OK					MIDFEED	OK	
T10	OK							
T11	OK							
T12	OK							
TSF	OK							
						<div> <div></div> <div>SENSOR THRESHOLD (mA)</div> <div>0.01</div> </div> <div> <div></div> <div>T. SENSOR THRESHOLD (°C)</div> <div>10</div> </div>		

Imagen 4.34. Estado de los sensores en la pestaña Sensor Status

4.2. Puesta en marcha y comprobación de funcionamiento

La puesta en marcha de la planta como se adelantó en el capítulo 1, en el epígrafe de Planificación temporal, se realizó en dos fases bien diferenciadas.

Una primera en donde el interfaz SCADA era un simple instrumento virtual con todos los actuadores trabajando en modo manual y carente de mensajes de información hacia el usuario. Además, el sistema de registro de información estaba desprovisto de base de datos (ver Tabla 4.1).

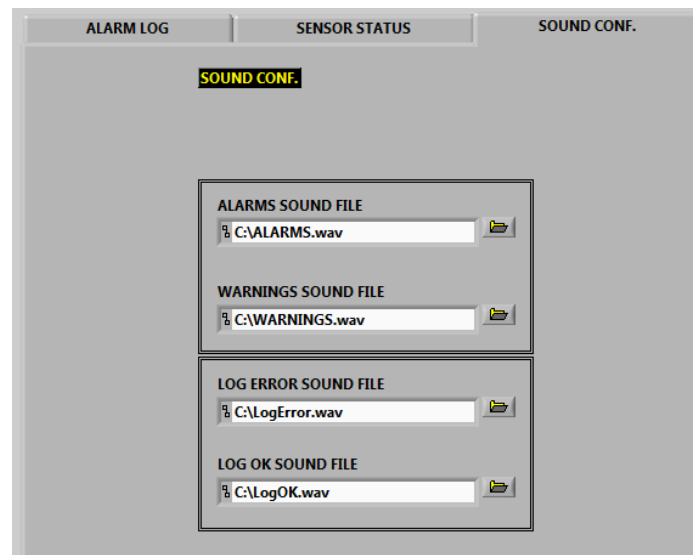


Imagen 4.35. Configuración de los sonidos del sistema en la pestaña *Sound Conf.*

La segunda fase (Tabla 4.2), completó la herramienta añadiendo funcionalidades como las alarmas, registro de datos, alarmas y eventos en una base de datos, se añadió la configuración para el modo automático, se añadió la posibilidad de programación en *script* de MATLAB, se crearon los distintos perfiles de usuario y por último se añadieron los pertinentes mensajes de información y descripciones de elementos en tiempo de ejecución.

Cada una de estas fases necesitó de un plan de pruebas propio, para asegurar el correcto funcionamiento de las partes. Posteriormente, el conjunto fue testeado y evaluado de forma exhaustiva por el operario de la planta en sus numerosos ensayos.

Obviamente, no fue un proceso breve en el tiempo y cada una de las mejoras o modificaciones llevadas a cabo se explicaron y fueron puestas a prueba por los operadores de la planta.

4.3. Análisis y resolución de problemas

A lo largo del desarrollo de este proyecto han sido muchos los problemas que han ido surgiendo en prácticamente todos los ámbitos. Pero dentro del ámbito ingenieril, dos han sido especialmente ilustrativos: El problema de ruido en las lecturas de los caudalímetros electromagnéticos y la adquisición de datos de la balanza con interfaz serie.

4.3.1. Problema del ruido en la lectura de los Promag 50H

Una vez se completó la primera fase detallada en el epígrafe anterior y cuando la planta comenzó a realizar los primeros ensayos de desalación, se detectó un grave problema de ruido en las lecturas de los caudalímetros F1, F2, F4, F5 y F6 de la planta.

En un principio se pensó en que un error en la configuración de dichos dispositivos había sido la responsable de un fallo generalizado en las medidas que aportaban todos ellos. Dichas medidas no eran estables y ofrecían un perfil tremendamente ruidoso. Se repasaron tanto los cables, como las masas y puesta a tierra de la instalación, pero no parecía afectar el resultado de dicha revisión a los malos resultados en las lecturas. Fue repasando las características de los mismos cuando se recaló en el dato de que su rango de medida era desde 0 a 50 l/min, cuando el caudal máximo en las instalaciones con las bombas y tuberías instaladas rara vez supera los 20 l/min. Se trataba de un problema de sobredimensionamiento, el cual se veía agravado por el ruido. Por tanto, la solución adoptada fue la de implementar un filtro paso bajo integrado en el sistema SCADA que pudiese eliminar esta componente de alta frecuencia, que es el ruido.

PLAN DE PRUEBAS: PRIMERA FASE	
BOMBAS Y AEROTERMO	
ACTIVAR/DESACTIVAR	Se comprobó que los botones de ON/OFF de cada uno de los variadores que gobernaban las bombas funcionaban de forma correcta y no existía ninguna etiqueta cambiada.
SELECCIÓN DE VELOCIDAD	Gracias a los caudalímetros y a los <i>displays</i> de los variadores, se pudo comprobar que se hacían efectivos los cambios en la consigna de velocidad de las bombas.
VÁLVULAS PROPORCIONALES	
SELECCIÓN DE POSICIÓN	Las maniobras de cambio de posición para las válvulas proporcionales tenían lugar en los sentidos deseados.
CONTROL DE POSICIÓN	Se comprobó gracias a las salidas de estas válvulas como se alcanzaba la consigna de posición solicitada.
VÁLVULAS DE RETENCIÓN	
ABRIR/CERRAR	Se aseguró que los comandos de abrir y cerrar las válvulas correspondían de forma unívoca con la válvula y tipo de maniobra.
SEÑALES DE MANIOBRA Y FINALES DE CARRERA	Gracias a la adaptación de los relés, se pudo comprobar el correcto funcionamiento de los finales de carrera (Abierto/Cerrado) y maniobra para cada válvula de retención.
VÁLVULA TODO/NADA	
CAMBIO DE POSICIÓN	Asegurarse que la selección de dirección del caudal era la correcta y concordaba con el sinóptico.
SENSORES DE PRESIÓN	
LECTURA	Se prueba la lectura de medida de presión de los sensores instalados, contrastándola con los manómetros instalados.
SENSORES DE TEMPERATURA	
LECTURA	Se prueba la lectura de las medidas de temperatura y se contrasta con la lectura de sondas portátiles.
CAUDALÍMETROS	
LECTURA	Haciendo uso de los <i>displays</i> de los propios caudalímetros electromagnéticos, se comprueba la corrección de la medida de caudal.
FILTRADO	Ensayos de la mejora en la medida tras implementar un filtro paso bajo para el ruido.
REGISTRO DE DATOS	
CREACIÓN DE ARCHIVOS	Comprobar que se crean los cuatro archivos de texto solicitados por los operadores.
FORMATO DE ARCHIVOS	Asegurarse de que se guardan las variables en el formato y con el período de guardado correcto.

Tabla 4.1. Plan de pruebas: Primera Fase

PLAN DE PRUEBAS: SEGUNDA FASE	
MENSAJES DE USUARIO	
MENSAJES EMERGENTES	Se prueba para todos los elementos actuadores y botones, que los mensajes emergentes se muestran de forma acorde.
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS	En tiempo de ejecución, se muestran pequeños textos descriptivos para los elementos con los cuales el usuario puede interactuar.
ALARMAS	
MÁRGENES DE SEGURIDAD	Se comprueba el disparo de las alarmas y su histéresis, cuando se exceden los márgenes de seguridad.
FALLOS DE SENSOR	Se asegura el correcto funcionamiento de la alarma de sensor, disparándola simulando errores desconectando sensores.
REGISTRO	Se aprecia que cada vez que se produce una alarma, esta queda registrada en tiempo de ejecución, además de en un archivo de texto plano.
BASE DE DATOS	
TEMPORIZACIÓN	Se comprueba que la temporización de guardado se corresponde con la fijada en el SCADA.
TABLAS	Se observa que el registro de los Eventos, Alarmas y Datos se realiza de forma correcta y en sus tablas correspondientes.
MODO AUTOMÁTICO	
ON/OFF	Se garantiza que cuando se pulsa el botón del modo automático, se empiezan a ejecutar los comandos del <i>script</i> de MATLAB.
INTERFAZ	Se comprueba cómo el interfaz cambia de modo Manual al Automático, donde desaparecen los controles manuales y sólo quedan los indicadores y sensores.
PERFILES DE USUARIO	
ACCESO	Se prueba el acceso correcto de cada uno de los tres perfiles de usuario.
INTERFAZ	Se verifica que cada uno de los usuarios tiene acceso a las partes del interfaz correspondiente a su perfil.

Tabla 4.2. Plan de pruebas: Segunda Fase

Para diseñar un filtro específico para cada caudalímetro se llevó a cabo el siguiente ensayo:

Con el circuito en frío a primera hora de la mañana, para evitar la aparición de vapor y la consiguiente pérdida de caudal, se recogieron los datos del caudal máximo con las bombas a pleno rendimiento. A esos datos, se les asignó el valor fijo de medida que mostraba el caudalímetro en su propio display, tras lo cual sólo restaba sacar los modelos de cada uno de ellos.

Tras lograr realizar este experimento y aplicando un filtro de la media con 10 valores (este valor se puede modificar en tiempo de ejecución), se verificó que esto afecta a la dinámica de las bombas desde el punto de vista del control. La dinámica de las bombas es casi instantánea a cambios en escalón. Al incluir este filtro de la media, habrá que modelarla como un sistema de primer orden con una constante de tiempo de 10 segundos debido a este filtro. Los datos para calcular los parámetros de la recta de calibrado para cada caudalímetro fueron analizados en MATLAB empleando los siguientes códigos:

F1 y F2 parámetros de filtrado y calibración:

$m=10$; % número de valores utilizados para el filtro de la media. En principio se realizará la media de los últimos 10 valores.

$mediaQa=0.0107$; % valor en Amperios leído a máximo caudal (en media)
 $media Q= 20.81$; % valor en l/min leído a máximo caudal (en media)
 $Qamin=0.004$; % valor en Amperios leído a mínimo caudal (0 l/min->4 mA)
 $a=mediaQ/(mediaQa-Qamin)$; % Pendiente de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min
 $b=-a*Qamin$; % Ordenada en el origen de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

for $k=1:fin_ensayo$ % En cada periodo de muestreo.

1. Leer los datos de intensidad ($Qa(k)$), donde k indica el periodo de muestreo actual.
2. Filtrar la lectura mediante el filtro de la media, tomando $Qaf(k)=mean(Qa(k-m:k))$;
3. Se convertirá la medida de intensidad filtrada a caudal en l/min mediante la correspondiente recta de calibración.

$Q(k)=a*Qaf(k)+b$;

If $Q(k)<0$ $Q(k)=0$ end; % se eliminan valores negativos debidos a varianza del ruido.

F4 parámetros de filtrado y calibración

$m=10$; % número de valores utilizados para el filtro de la media. En principio se realizará la media de los últimos 10 valores

$mediaQa=0.0131$; % valor en Amperios leído a máximo caudal (en media)
 $media Q= 28.5285$; % valor en l/min leído a máximo caudal (en media)
 $Qamin=0.004$; % valor en Amperios leído a mínimo caudal (0 l/min -> 4 mA)
 $a=mediaQ/(mediaQa-Qamin)$; % Pendiente de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.
 $b=-a*Qamin$; % Ordenada en el origen de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

for $k=1:fin_ensayo$ % En cada periodo de muestreo.

1. Leer los datos de intensidad ($Qa(k)$), donde k indica el periodo de muestreo actual.
2. Filtrar la lectura mediante el filtro de la media, tomando $Qaf(k)=mean(Qa(k-m:k))$;
3. Se convertirá la medida de intensidad filtrada a caudal en l/min mediante la correspondiente recta de calibración

$Q(k)=a*Qaf(k)+b$;

If $Q(k)<0$ $Q(k)=0$ end; % se eliminan valores negativos debidos a varianza del ruido.

F5 parámetros de filtrado y calibración

$m=10$; % número de valores utilizados para el filtro de la media. En principio se realizará la media de los últimos 10 valores.

$mediaQa=0.0104$; % valor en Amperios leído a máximo caudal (en media)

$media Q= 19.88$; % valor en l/min leído a máximo caudal (en media)

$Qamin=0.004$; % valor en Amperios leído a mínimo caudal (0 l/min -> 4 mA)

$a=mediaQ/(mediaQa-Qamin)$; % Pendiente de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

$b=-a*Qamin$; % Ordenada en el origen de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

for $k=1:fin_ensayo$ % En cada periodo de muestreo.

1. Leer los datos de intensidad ($Qa(k)$), donde k indica el periodo de muestreo actual.
2. Filtrar la lectura mediante el filtro de la media, tomando $Qaf(k)=mean(Qa(k-m:k))$;
3. Se convertirá la medida de intensidad filtrada a caudal en l/min mediante la correspondiente recta de calibración

$$Q(k)=a*Qaf(k)+b;$$

If $Q(k)<0$ $Q(k)=0$ end; % se eliminan valores negativos debidos a varianza del ruido.

F6 parámetros de filtrado y calibración

$m=10$; % número de valores utilizados para el filtro de la media. En principio se realizará la media de los últimos 10 valores.

$mediaQa=0.0105$; % valor en Amperios leído a máximo caudal (en media)

$media Q= 20.461$; % valor en l/min leído a máximo caudal (en media)

$Qamin=0.004$; % valor en Amperios leído a mínimo caudal (0 l/min -> 4 mA)

$a=mediaQ/(mediaQa-Qamin)$; % Pendiente de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

$b=-a*Qamin$; % Ordenada en el origen de la recta de calibración de paso de Amperios a l/min.

for $k=1:fin_ensayo$ % En cada periodo de muestreo.

1. Leer los datos de intensidad ($Qa(k)$), donde k indica el periodo de muestreo actual.
2. Filtrar la lectura mediante el filtro de la media, tomando $Qaf(k)=mean(Qa(k-m:k))$;
3. Se convertirá la medida de intensidad filtrada a caudal en l/min mediante la correspondiente recta de calibración.

$$Q(k)=a*Qaf(k)+b;$$

If $Q(k)<0$ $Q(k)=0$ end; % se eliminan valores negativos debidos a varianza del ruido.

El valor obtenido de cada uno de estos códigos sería el valor que en teoría deberá mostrar el SCADA y será el empleado para efectuar el control de la planta. La transcripción de dicho código a *LabVIEW* correspondería con las siguientes capturas de pantalla.

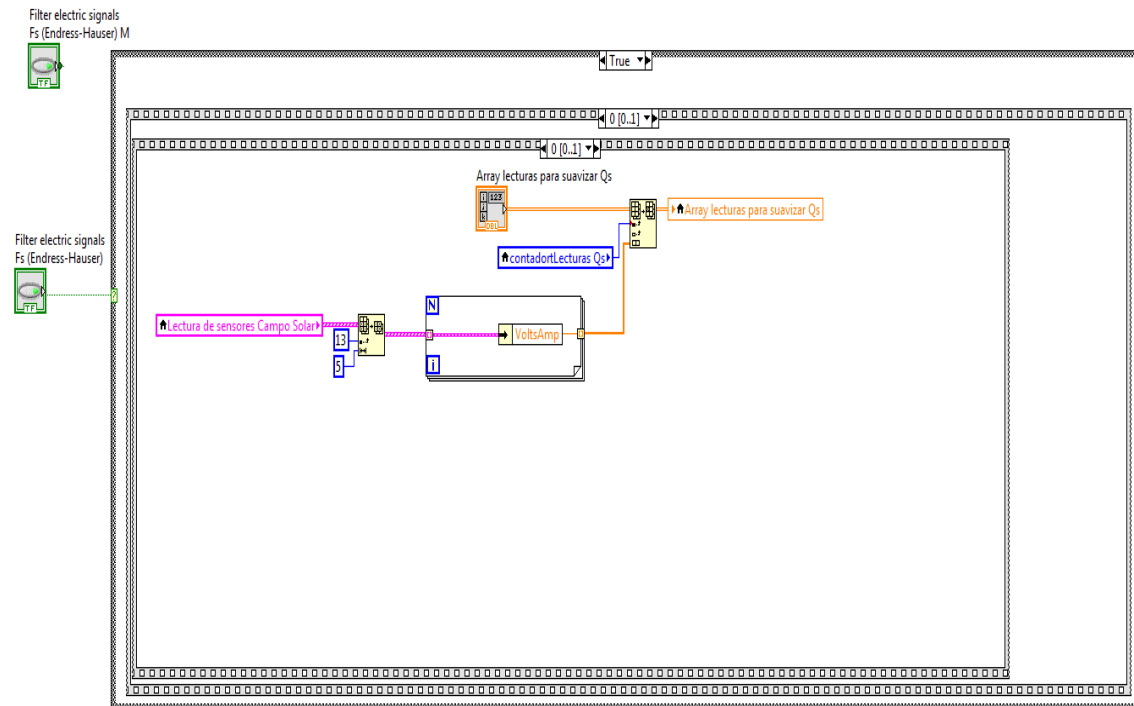


Imagen 4.36. Implementación de filtro en *LabVIEW*

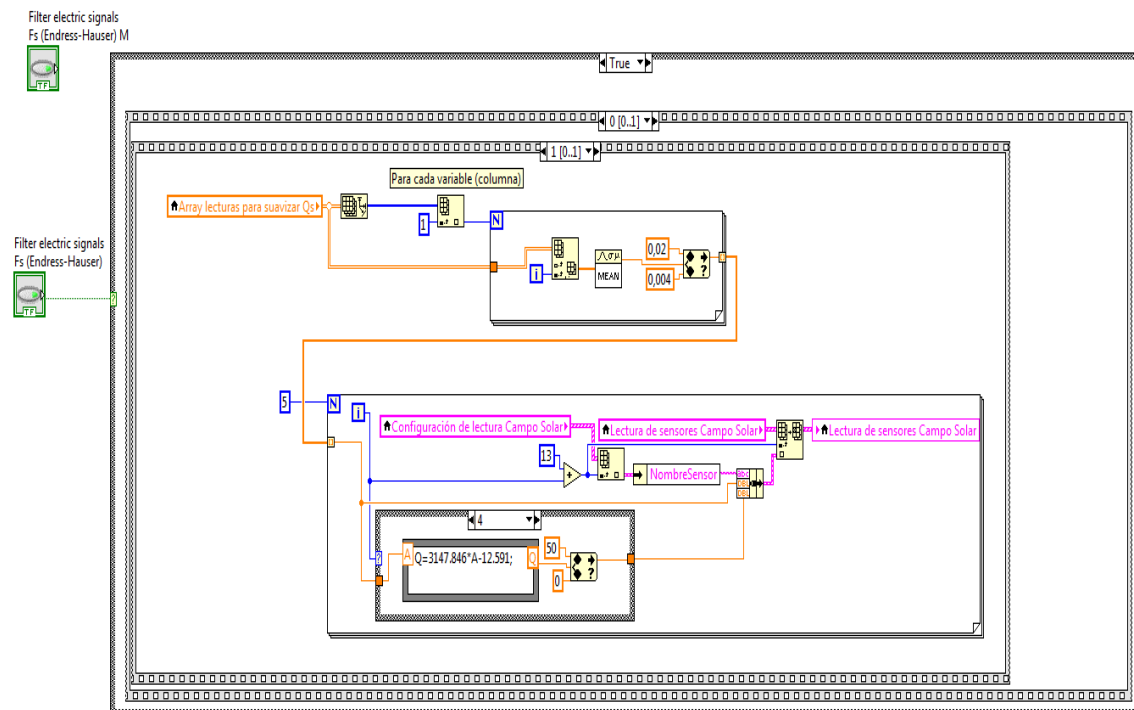


Imagen 4.37. Implementación de filtro en *LabVIEW* (II)

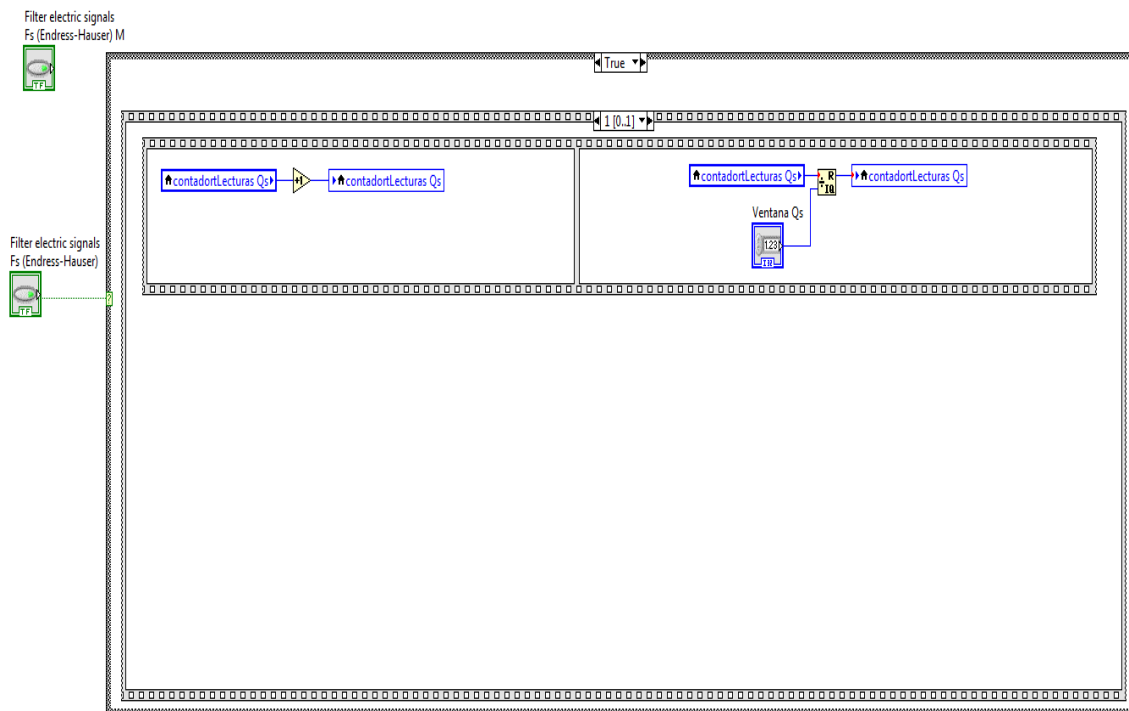


Imagen 4.38. Implementación de filtro en LabVIEW (III)

Y una vez implementado el filtro ya sólo restaba probarlo, para lo cual se realizó un ensayo con las bombas trabajando al 100%, 50% y paradas, ofreciendo los resultados mostrados en las Imágenes de la 4.39 a la 4.43.

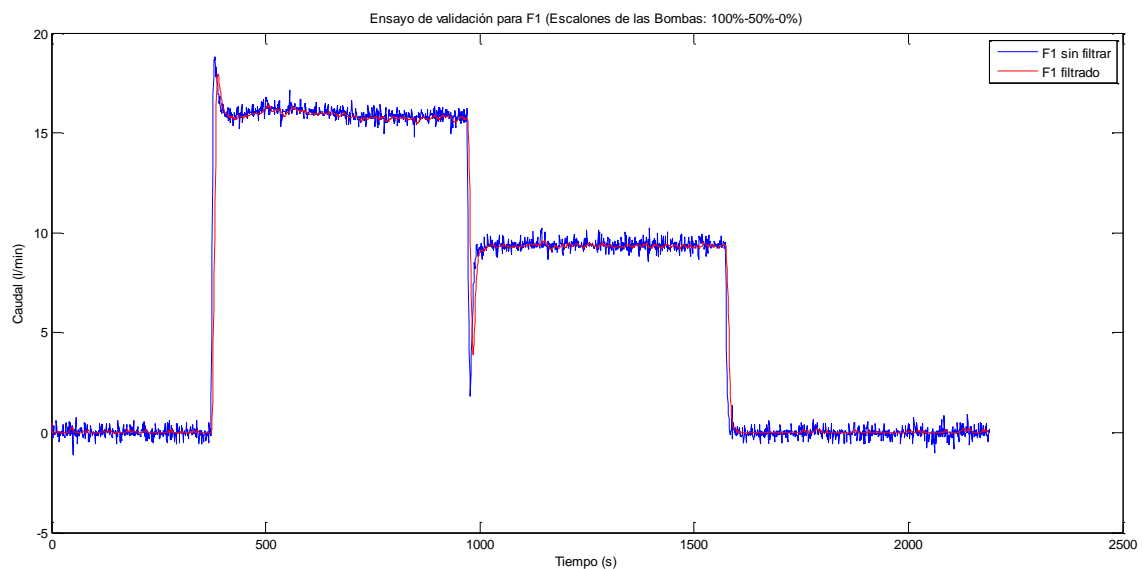


Imagen 4.39. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F1

Como se puede comprobar la mejora de la medida del caudal para cada caudalímetro es considerablemente importante. Nótese también el desplazamiento de 10 muestras en la señal filtrada, fruto de las 10 muestras necesarias para generar el primer valor filtrado. Este detalle, como se ha comentado deberá ser tenido en cuenta de cara al control.

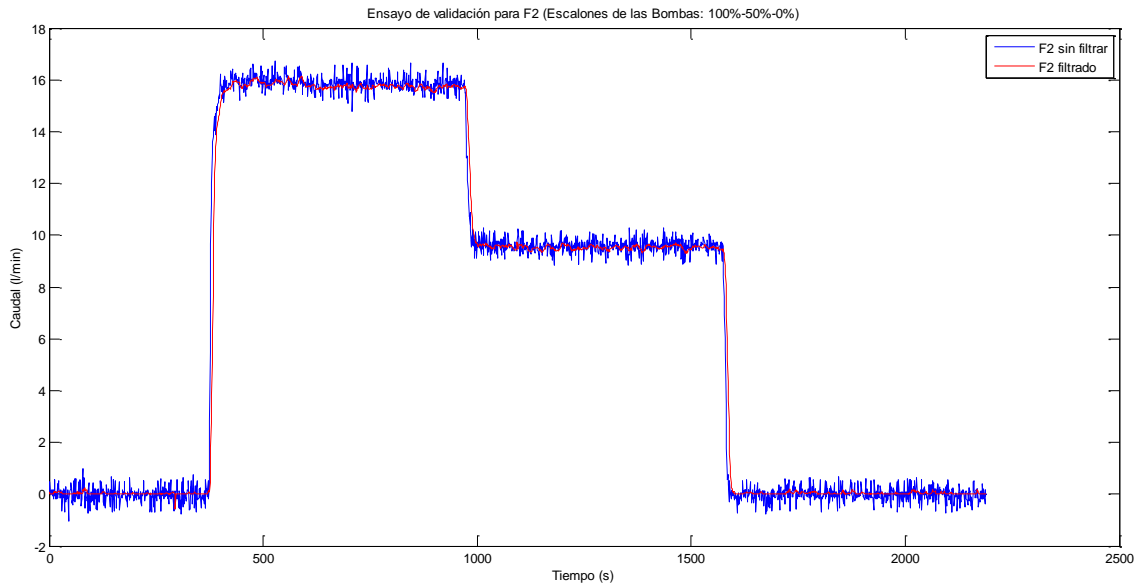


Imagen 4.40. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F2

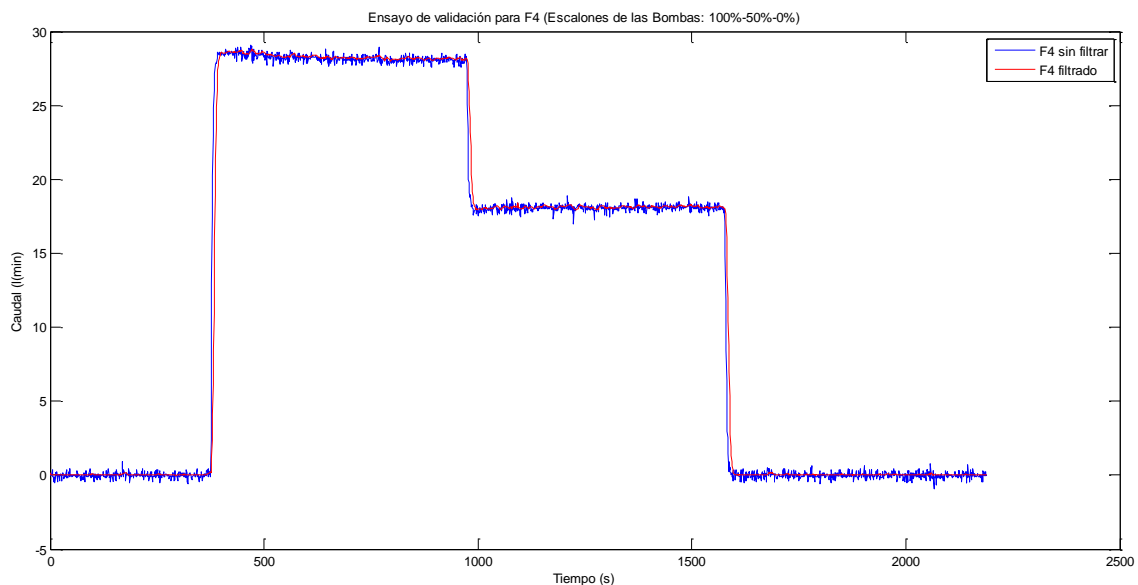


Imagen 4.41. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F4

4.3.2. Problema en la adquisición de datos de la FG-150KAL

De lleno en la segunda fase del proyecto, surgió la necesidad de incluir una balanza con interfaz serie en el sistema de adquisición de datos.

Tras realizar la instalación de la misma y configurar los puertos, sorprendentemente, comenzó a funcionar de forma correcta a la primera. Pero este hecho, poco común durante la instalación de la planta, pronto volvería a la normalidad. Cada lapso de tiempo aleatorio se perdían ráfagas de datos (unos 10 minutos de datos en ensayos de 4 horas).

En un principio se pensó en la longitud del cable como posible fuente de este error, por encontrarse en el límite de las especificaciones del protocolo serie, pero tras acortar dicho cable y bajar la velocidad de transferencia, el problema persistía.

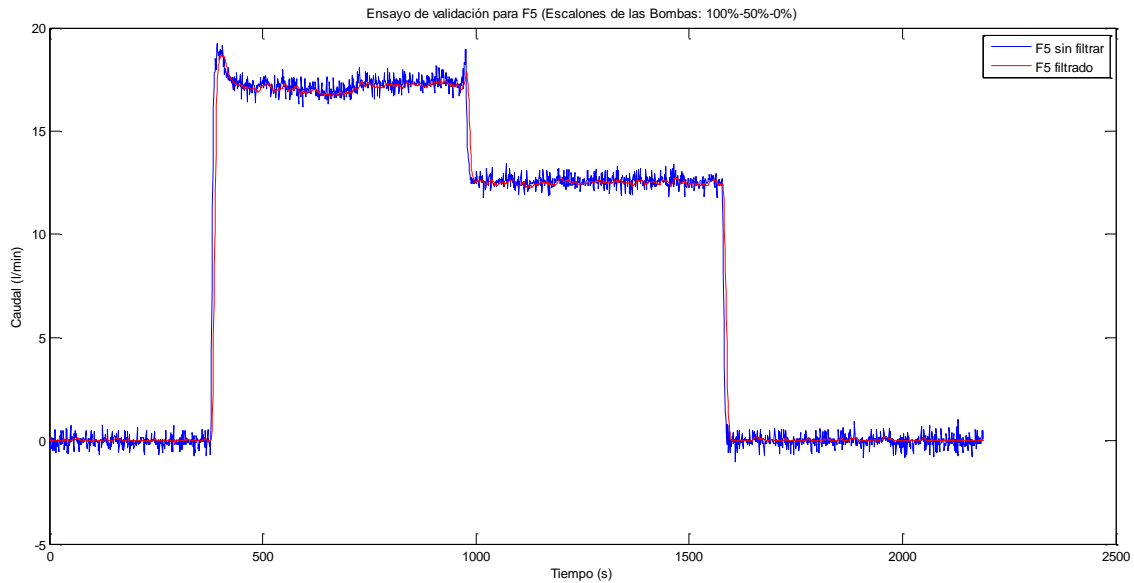


Imagen 4.42. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F5

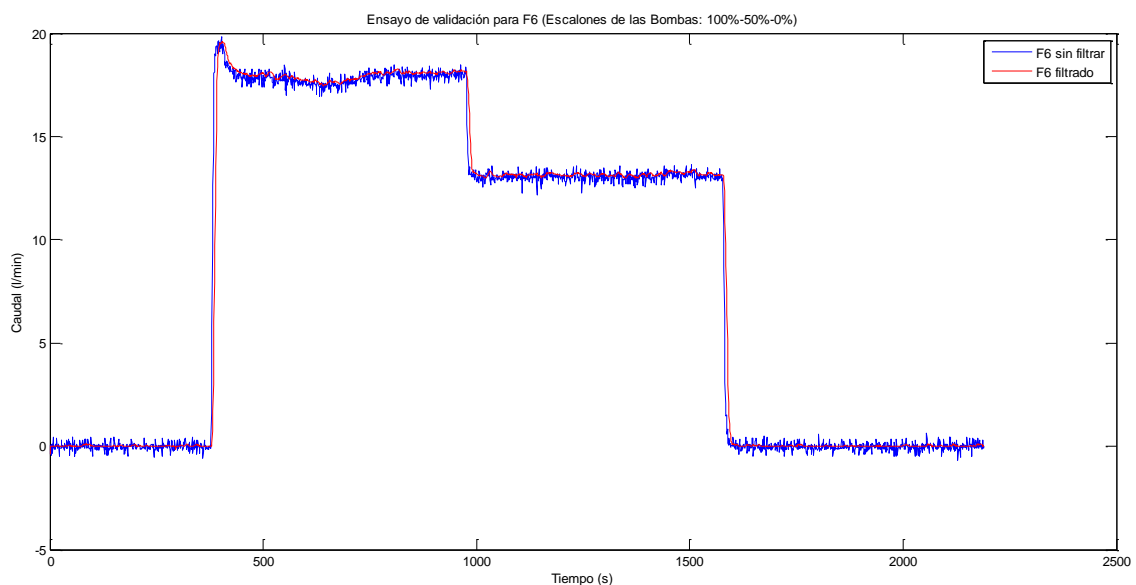


Imagen 4.43. Ensayo de validación del filtro para el caudalímetro F6

La solución consistió en descubrir que el fallo provenía de la gestión del *buffer*, dado que la balanza publicaba 10 veces por segundo los datos del peso, lo que acababa desbordando el *buffer* antes de que el sistema lo vaciase de forma automática. Por tanto, el *buffer* fue redimensionado a 32 Mb y forzada la limpieza del mismo después de cada lectura.

Tras adoptar esta medida se consiguió solucionar la ‘misteriosa’ pérdida de datos en las pesadas de destilado.

Estos dos problemas que se han analizado en este epígrafe de forma sintetizada y dando con la solución de forma rápida y elegante, consumieron gran cantidad del tiempo de desarrollo de este proyecto.

4.4. Evaluación de la herramienta SCADA por parte de los responsables de la instalación.

El desarrollo de este SCADA no se ha llevado a cabo de forma aislada a los operadores y responsables de las instalaciones, sino que por el contrario muchas modificaciones y aportes han sido fruto de la estrecha colaboración llevada a cabo.

Como se adelantó en capítulos anteriores se han empleado los indicadores de la guía GEDIS para valorar la calidad de la herramienta.

El ingeniero y doctorando responsable de la de la instalación de desalación, que a su vez ha sido formado en el uso pormenorizado del interfaz, ha sido el encargado de rellenar la siguiente tabla.

ELEMENTO	VALORACIÓN	COMENTARIO
1. Arquitectura	5	
1.1. Correspondencia	5	Fidedigna con la planta
1.2. Número de capas	5	No supera las 4 capas
2. Distribución	4.50	
2.1. Consistencia	5	
2.2. Densidad	5	
2.3. Simetría y balance	3	
2.4. Flujo de proceso	5	
3. Navegación	4.33	
3.1. Correspondencia con arquitectura	5	
3.2. Accesibilidad	5	
3.3. Consistencia	3	
4. Uso del color	4.33	
4.1. Visibilidad	3	
4.2. Contraste con el fondo	5	
4.3. Número de colores	5	
4.4. Diferenciabilidad entre colores	3	
4.5. Uso de los colores típicos (rojo, verde, amarillo)	5	Se emplean los colores típicos
4.6. Consistencia	5	
5. Información textual	4.78	
5.1. Número de fuentes	5	Sólo 1 tipo de fuente
5.2. Número de tamaños	5	Sólo 2 tipos de tamaños
5.3. Visibilidad del texto	5	
5.4. Espaciamento	3	
5.5. Alineación	5	
5.6. Uso del énfasis	5	
5.7. Uso de acrónimos	5	
5.8. Coloración del texto	5	
5.9. Consistencia	5	
6. Símbolos y representaciones de los equipos	4.33	
6.1. Facilidad de reconocimiento	3	
6.2. Visibilidad del estado del equipo	5	
6.3. Consistencia	5	

Tabla 4.3. Evaluación de la herramienta SCADA

ELEMENTO	VALORACIÓN	COMENTARIO
7. Valores de proceso	5	
7.1. Visibilidad	5	
7.2. Ubicación	5	
7.3. Distribución	5	
7.4. Agrupación de datos	5	
7.5. Consistencia	5	
8. Tablas y grupos de tendencia	4.33	
8.1. Formato	5	
8.2. Visibilidad	3	
8.3. Ubicación	3	
8.4. Agrupación	5	
8.5. Flexibilidad de configuración de tendencias	5	
8.6. Consistencia	5	
9. Comandos e ingreso de datos	4.5	
9.1. Visibilidad	5	
9.2. Maniobrabilidad	3	
9.3. Retroalimentación	5	
9.4. Consistencia	5	
10. Alarmas	5	
10.1. Visibilidad de la ventana de alarmas	5	
10.2. Accesibilidad de la ventana de alarmas	5	
10.3. Ubicación de la ventana de alarmas	5	
10.4. Información de los textos	5	
10.5. Visibilidad de alarmas en sinópticos	5	Colocada justo en el centro
10.6. Facilidad de reconocimiento	5	
10.7. Consistencia	5	
Evaluación Global	4.6	

Tabla 4.4. Evaluación de la herramienta SCADA (Continuación)

Capítulo 5. Conclusiones y propuesta de mejoras

“Lo que no me mata, me hace más fuerte” - Friedrich Wilhelm Nietzsche.

Ésta bien podría ser la idea central de las conclusiones para este proyecto. Lo que comenzó siendo un breve ejercicio de diseño, se ha convertido en una realidad totalmente operativa. Y dado que la realidad supera la ficción, ni en las mejores fantasías previas a abordar los trabajos aquí descritos, se hubiese pensado en el colosal aprendizaje alcanzado.

Pero todo este aprendizaje y consecuciones de objetivos fijados no han sido gratuitos. El precio pagado en algunos casos en tiempo y esfuerzo fue absurdamente alto para la herramienta SCADA final. Gran parte de esta culpa la tiene el entorno de programación *LabVIEW*, donde su versatilidad se convirtió en una incompatibilidad que obligó a rehacer todo el código en tres ocasiones por errores aleatorios producidos durante la programación. A día de hoy los ingenieros de NI no pueden dar respuesta o solución del porqué.

Pero donde surge un problema, también aparece una oportunidad. Cada una de las reescrituras el código era más eficiente y se le añadían nuevas funcionalidades que en un principio ni se habían barajado.

Dejando a un lado las vicisitudes con el software, poder formar parte de un proyecto de estas características y trabajar, codo con codo, con investigadores y profesionales de primer nivel ha sido una experiencia terriblemente enriquecedora. Cada día, tras cada nuevo problema, mis conocimientos y habilidades adquiridos durante la carrera, eran puestos a prueba e incrementados con cada solución alcanzada. La satisfacción con el grado de consecución de los objetivos marcados, por parte de estos investigadores es una de las mayores recompensas.

Sin embargo, nuevas mejoras y objetivos se plantean en el horizonte para el sistema SCADA de la instalación, pues la propia planta se ve modificada y mejorada constantemente. Parte de esas nuevas tareas de mejora se podrían enumerar en:

- Implementar un controlador embebido en el propio código SCADA para las válvulas proporcionales y así controlar el caudal de forma más eficiente.
- Desarrollar un servidor *Web* seguro para poder operar de forma remota.
- Perfeccionar el sistema de permisos para usuarios. Poder asignar perfiles de usuario y registrar nuevos miembros.
- Crear un sistema de archivos de configuración. De esta forma las variables de configuración del sistema se puedan configurarse offline y guarden las modificaciones.
- Desarrollo en FPGA. Aunque como se explicó no era necesario, el tiempo de muestreo, puede convertirse en algo crucial para desarrollar estrategias de control.
- Perfeccionar el sistema de sensorización (inclusión de sensor de radiación solar, recolocar sondas de temperatura en lugares más propicios para el control).
- Sustitución de V2 por una válvula con salidas para informar de su posición. En la actual planta, sólo podemos comprobar de forma indirecta a través de los caudalímetros que efectivamente se cambia la dirección del caudal.
- Inclusión en la herramienta SCADA del control y adquisición de datos para una nueva desaladora por membrana: *Aquaver*.



Imagen 5.1. Desaladora Aquaver instalada con el grupo hidráulico del Campo Solar

Pero eso será otra historia, nos vemos en el futuro,... o el pasado.

Bibliografía

1. **Fernández, J. L., Moreno, D.** La peor sequía en medio siglo castiga al Levante. *ABC.es*. [En línea] 19 de Mayo de 2014. [Citado el: 6 de Junio de 2015.] <http://www.abc.es/sociedad/20140519/abci-sequia-sureste-empleos-201405182126.html>.
2. **Ruiz-Aguirre, A., Polo-López, M., Fernández-Ibáñez, P., Zaragoza, G.** Assessing the validity of solar membrane distillation for disinfection of contaminated water. *Desalination and Water Treatment*. 2014. doi: 10.1080/19443994.2014.946717.
3. **Zaragoza, G., Ruiz-Aguirre, A., Guillén-Burrieza, E.** Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production. *Applied Energy*. Vol. 130, pp. 491–499, 2014.
4. **Rodríguez Penin, A.** *Sistemas SCADA*. Barcelona : Marcombo, 2012.
5. —. *Sistemas SCADA - Guía práctica*. Barcelona : Marcombo, 2007.
6. **CIESOL.** CIESOL. [En línea] [Citado el: 9 de Junio de 2015.] <http://www.ciesol.es/index.php?Idioma=ES&Opcion=6&Pagina=80>.
7. **Gil, J. D., Ruiz-Aguirre, A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., Guzman, J. L.** Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar - Parte 1: Esquemas. *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*. Bilbao, España : CEA, 2015.
8. —. Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar - Parte 2: Resultados. *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*. Bilbao, España : CEA, 2015.
9. **Alkhudhiri, A., Darwish, N., Hilal, N.** Membrane distillation: “A comprehensive review”. *Desalination*. Vol. 287, pp. 2–18, 2012.
10. **Camacho, L. M., Dumée, L., Zhang, J., Li, J., Duke, M., Gomez, J., Gray, S.** Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications. *Water*. Vol. 5, pp 94-196, 2013.
11. **Charcosset, C.** A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*. Vol. 245, pp. 214-231, 2009.
12. **Drioli, E., Ali, A., Macenonio, F.** Membrane distillation: Recent developments and perspectives . *Desalination*. Vol. 356, pp. 56-84, 2015.
13. **Porrizzo, R., Cipollina, A., Galluzzo, M., Micale, G.** A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 54, pp. 79-96, 2013.
14. **Gil, J. D., Ruiz-Aguirre, A., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M.** Solar membrane distillation: a control perspective. *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015)*, pp. 836-842. Torremolinos, Spain, 2015.
15. **Guillén-Burrieza, E., Blanco, J., Zaragoza, G., Alarcón, D.C., Palenzuela, P., Ibarra, M., Gernjak, W.** Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system . *Journal of Membrane Science*. Vol. 379, pp. 386–396, 2011.
16. **El-Bourawi, M. S., Ding, Z., Ma, R., Khayet, M.** A framework for better understanding membrane distillation separation process. *Journal of Membrane Science*. Vol. 85, pp. 4-29, 2006.
17. **Guillén-Burrieza, E., Zaragoza, G., Miralles-Cuevas, S., Blanco, J.** Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination. *Journal of Membrane Science*. Vol. 409-410, pp. 264–275, 2012.

18. **Ruiz-Aguirre, A., Alarcón-Padilla, D. C., Zaragoza, G.** Productivity analysis of two spiral-wound membrane distillation prototypes coupled with solar energy. *Desalination and Water Treatment*. 2015. DOI: 10.1080/19443994.2014.946711.
19. **Saffarini, R. S., Summers, E. K., Arafat, H. A., Lienhard, J. H.** Technical evaluation of stand-alone solar powered membrane distillation systems. *Desalination*. Vol. 286, pp. 332-341, 2012.
20. **Wang, P., Chung, T. S.** Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of Membrane Science*. Vol. 474, pp. 39-56, 2015.
21. **Ling, J. S., Chang, H., Wang, G. B.** Modelling and control of the solar powered membrane distillation system. In *AIChE annual meeting*. Minneapolis, MN, USA, 2011.
22. **Chang, H., Wang, G-B., Chen, Y-H., Li, C-C., Chang, C-L.** Modeling and optimization of a solar driven membrane distillation desalination system. *Renewable Energy*. Vol. 35, pp. 2714-2722, 2010.
23. **Chang, H., Lyu S-G., Tsai C-M., Chen, Y-H., Cheng, T-W., Chou, Y-H.** Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process. *Desalination*. Vol. 286, pp. 400-411, 2012.
24. **Molina Martínez, J.M., Jiménez Buendía, M.** *Programación gráfica para ingenieros*. Barcelona : Marcombo, 2010.
25. **Cheng, D. K.** *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. México : Addison Wesley Iberoamericana, S.A., 1997.
26. **Oppenheim, A. V., Willsky, A. S.** *Señales y Sistemas*. México : Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1998.
27. **Bandera Rubio, A., Ruiz García, M., Casilari Pérez, E., Téllez Labao, C., Romero Jerez, J. M., Sánchez Pacheco, F. J.** *Fundamentos de Electrónica Analógica*. Málaga : Universidad de Málaga/Manuales, 2005.
28. **Cuesta García, L. M., Gil Padilla, A. J., Remiro Domínguez, F.** *Electrónica Analógica. Análisis de circuitos. Amplificación. Sistemas de alimentación*. Madrid : McGraw-Hill, 1991.
29. **National Instruments.** NI 9201/9221. Operating Instructions and Specifications. [En línea] Mayo de 2009. [Citado el: 13 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/373783g.pdf>.
30. —. Instrumentación Virtual e Instrumentación tradicional. [En línea] 7 de Febrero de 2008. [Citado el: 13 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/white-paper/4757/es/>.
31. **Wagner & Co.** Solar Heat Transfer Liquid DC20. [En línea] 2010. [Citado el: 17 de Junio de 2015.] http://www.wagnersolarshop.com/files/e84ad84f-6801-4a9f-8d4a-a11801004d7e/EN-XXX_DC20_TI-091110-11207500.pdf.
32. **Solar Spring.** Solar Spring: Solar-Driven Water Treatment. [En línea] 2013. [Citado el: 18 de Junio de 2015.] <http://www.solarspring.de/index.php?id=11>.
33. **Wagner & Co.** EURO Solar Collector L20 MQ AR. [En línea] 2010. [Citado el: 19 de Junio de 2015.] [http://www.wagnersolarshop.com/files/f33041d2-3294-4b30-9b06-a11600c461d1/EN-XXX_EURO-L20-MQ-AR_TI-101007-1WA10055\[1\].pdf](http://www.wagnersolarshop.com/files/f33041d2-3294-4b30-9b06-a11600c461d1/EN-XXX_EURO-L20-MQ-AR_TI-101007-1WA10055[1].pdf).
34. —. Warner & Co Tecnología Solar. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2015.] <http://es.wagner-solar.com/>.
35. **Ingesol, Canarias.** Manuales Aerotermos AAS1V y AAS4V. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2015.] <http://www.ingesolcanarias.es/wp/documentos/Accesorios/Aerotermos.pdf>.

36. **Endress+Hauser.** Termómetro para la medición delta T - Omnigrad M TST90. [En línea] 1 de Marzo de 2013. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] <http://www.es.endress.com/es/productos/medicion-temperatura/termometro-medicion-delta>.
37. —. Proline Promag 50 - Operating Instructions. [En línea] 2006. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/0373/000/06/BA046DEN_1209.pdf.
38. —. Cerebar T PMC131, PMP131, PMP135 - Technical Information. [En línea] 28 de Mayo de 2015. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] https://portal.endress.com/wa001/dla/5000557/7706/000/07/TI00415PEN_1915.pdf.
39. **JUMO.** JUMO CTI-500 - Operating Instructions. [En línea] 13 de Mayo de 2014. [Citado el: 20 de Junio de 2015.]
40. **A&D Company Ltd.** FG Series - Instruction Manual. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2015.] <http://www.aandd.jp/products/manual/balances/newfg.pdf>.
41. **Grundfos.** Grundfos SOLAR - Product Information. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2015.] <http://www.adara-bg.com/img/140113114219UPSSolar.pdf>.
42. **INVERTEK.** Invertek Drives - Guía de Usuario. [En línea] 2009. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] http://www.invertekdrives.com/client-uploads/download-manager/user-guides/82-E2MAN-SP%20Invertek%20ODE-2%20User%20Guide%20Iss2.05_ESPA%C3%91OL.pdf.
43. **Danfoss.** Actuator for three point control AMV 25 SD, AMV 25 SU - Data sheet. [En línea] Marzo de 2005. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] http://heating.danfoss.com/PCMPDF/AMV25SD-25SU_VDABN202.pdf.
44. —. Actuator for modulating control AME 435 - Data Sheet. [En línea] Junio de 2009. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] http://heating.danfoss.com/PCMPDF/VDLEK102_AME435.pdf.
45. —. ON/OFF Zone valve AMZ 112 & AMZ 113 - Instruction. [En línea] Enero de 2013. [Citado el: 20 de Junio de 2015.] http://dk.varme.danfoss.com/PCMPDF/AMZ%20112_113%20instruktion.pdf.
46. **Schneider Electric.** Relés para control y bornes Telemecanique. [En línea] [Citado el: 21 de Junio de 2015.] <http://www.schneider-electric.cl/documents/local/cap04.pdf>.
47. **Rodríguez Penin, A.** *Comunicaciones Industriales - Guía Práctica*. Barcelona : Marcombo, 2008. 84-267-1510-9.
48. **National Instruments.** CompactRIO cRIO-9072/3/4 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Junio de 2010. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/374639e.pdf>.
49. —. NI 9146 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Agosto de 2012. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/375649a.pdf>.
50. **StarTech.** 5 Port Unmanaged Industrial Ethernet Switch - Data Sheet. [En línea] [Citado el: 21 de Junio de 2015.] <https://content.etalize.com/Manufacturer-Brochure/1014506890.pdf>.
51. **National Instruments.** NI 9217 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Mayo de 2008. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/374187c.pdf>.
52. —. NI 9203 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Febrero de 2008. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/374070c.pdf>.

53. —. NI 9264 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Octubre de 2009. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/374404e.pdf>.
54. —. NI 9375 - Operating Instructions and Specifications. [En línea] Mayo de 2012. [Citado el: 14 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/pdf/manuals/374644b.pdf>.
55. **Ponsa, P., Díaz, M., Catalá, A.** Creación de guía ergonómica para el diseño de interfaz de supervisión. *En VII Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador.-Puertollano (Ciudad Real)*. 2006.
56. **Fitzpatrick, B. A.** ISA 101 and HMI Workshop. [En línea] 2012. [Citado el: 16 de Junio de 2015.] http://www.yokogawausersconference.com/uploads/3/1/8/5/3185440/mesatutorial_-_isa101_hmiworkshop.pdf.
57. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** Guía Técnica: Evaluación y Prevención de los Riesgos Relativos a la Utilización de Equipos con Pantallas de Visualización. [En línea] 2006. [Citado el: 16 de Junio de 2015.] <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/pantallas.pdf>.
58. **Rodríguez, F., Moreno, J. C.** Tema 3, Sistemas SCADA. *Informática Industrial. Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Almería*. 2013.
59. Norma UNE 1063. Act. 2000. [En línea] 2000. [Citado el: 16 de Junio de 2015.] <http://www.sister-soft.com/wp-content/uploads/2012/05/UNE-1063.pdf>.
60. **Colomer, J., Meléndez, J. Ayza, J.** *Sistemas de supervisión*. Barcelona : CEA-IFAC, 2000.
61. **National Instruments.** Using NI CompactRIO Scan Mode with NI LabVIEW Software. [En línea] 19 de Septiembre de 2013. [Citado el: 24 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/white-paper/7338/en/>.
62. —. Fundamentos del entorno LabVIEW. [En línea] [Citado el: 25 de Junio de 2015.] <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/esa/environment>.

El desarrollo del presente trabajo se ha realizado dentro el grupo de investigación TEP-197: Automática, Robótica y Mecatrónica que forma parte del Centro Mixto de Investigación en Energía Solar CIESOL. El centro CIESOL es un instituto mixto de investigación creado y gestionado entre la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería, perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) del Ministerio de Economía y Competitividad. A lo largo de esta memoria, se tratarán de describir los trabajos realizados para llevar a cabo la instalación del control automático de una planta de destilación por membranas, asistida por energía solar y la implementación de la herramienta SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition System*, sistema de control supervisor y adquisición de datos) encargada de gobernar dichas instalaciones experimentales. Una primera parte abordará desde un punto de vista físico y eléctrico todo el sistema de control y adquisición de datos. En el segundo bloque, se encuentra la explicación del desarrollo de la herramienta SCADA y una descripción de sus funcionalidades.

This dissertation has been developed within the framework of the research Group: TEP-197: Automatic Control, Robotics and Mechatronics, which is part of the Mixed Research Center on Solar Energy CIESOL. The research center CIESOL is a mixed institution set up and managed between University of Almería and the PSA (Plataforma Solar de Almería) which is part of CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness. The first part of the manuscript reflects the procedure and solutions proposed to setup the electrical and instrumentation system required to control a solar membrane distillation facility, while the second part includes the development of a Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) for this system.

